

ДОНБАССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Выпуск 10 (53) 2018



СБОРНИК
НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**Сборник
научных трудов
Донбасского государственного технического
университета**

Сборник
Выходит 1–4 раза в год
Основан в июне 1999 г.
Выпуск 10 (53) 2018

**Збірник наукових праць
Донбаського державного технічного університету**

Збірник
Виходить 1–4 рази на рік
Заснований у червні 1999 р.
Випуск 10 (53) 2018

Collection of Scientific Papers of DonSTU

Collection
Publishing 1–4 times a year
Founded in June 1999
Issue 10 (53) 2018

Алчевск
2018

УДК 622(06) + 669(06) + 69(06) + 65.011.56 +
+ 621.3 + 33 + 621.37 + 1

**Сборник научных трудов
Донбасского государственного
технического университета**

Сборник

Выпуск 10 (53) 2018

**Основатель:
Донбасский государственный
технический университет**

*Свидетельство Министерства информации,
печати и массовых коммуникаций ЛНР
о государственной регистрации средства массовой
информации МИ-СГР ПИ 000003
от 05.02.2016*

*Приказом Министерства образования и науки
Донецкой Народной Республики от 2 мая 2017 г.
№ 464 сборник научных трудов включён в Перечень
рецензируемых научных изданий, в которых
должны быть опубликованы основные научные
результаты диссертаций на соискание учёной
степени кандидата наук, на соискание учёной
степени доктора наук, утверждённый приказом
Министерства образования и науки Донецкой
Народной Республики от 1 ноября 2016 г. № 1134,
согласно приложению 1*

*Рекомендовано учёным советом
ГОУВПО ЛНР «ДонГТУ»
(Протокол № 10 от 19.06.2018)*

Включён в наукометрическую базу данных РИНЦ

Формат 60×84%.

Усл. печат. л. 9,6

Заказ №

Тираж 100 экз.

Издательство не несёт ответственности за
содержание материала, предоставленного автором
к печати.

Адрес редакции, издателя и основателя:
ГОУВПО ЛНР «Донбасский государственный
технический университет»
пр. Ленина, 16, г. Алчевск, ЛНР
94204

E-mail: info@dstu.education
Web-site: <http://www.dstu.education>

ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ ЦЕНТР,
ауд. 2113, т./факс 2-58-59

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя
и распространителя средства массовой
информации
МИ-СГР ИД 000055 от 05.02.2016.

Главный редактор

Зинченко А. М. — к.э.н., и.о. ректора

Заместитель главного редактора

Новохатский А. М. — д.т.н., проф.

Редакционная коллегия:

Литвинский Г. Г. — д.т.н., проф.

Финкельштейн З. Л. — д.т.н., проф.

Корнеев С. В. — д.т.н., проф.

Леонов А. А. — к.т.н., доц.

Харламов Ю. А. — д.т.н., проф.

Ульяницкий В. Н. — к.т.н., проф.

Зелинский А. Н. — к.т.н., проф.

Куберский С. В. — к.т.н., проф.

Денищенко П. Н. — к.т.н., доц.

Дрозд Г. Я. — д.т.н., проф.

Шолух Н. В. — д. арх., проф.

Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.

Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомская С. А. — секретарь редакционной
коллегии.

Для научных сотрудников, аспирантов,
студентов высших учебных заведений.

Язык издания:

русский, украинский и английский

Компьютерная вёрстка и корректура
Исмаилова Л. М.

© ГОУВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018
© Чернышова Н. В., художественное
оформление обложки, 2018

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ

GEOSCIENCES

УДК 622.831: 622.28

Проф. Литвинский Г. Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, ligag@ya.ru)

КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ И ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД ВОКРУГ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

Предложена математическая модель кинетики деформирования пород на основе использования временных процессов их разрушения. Проведены теоретические исследования законов изменения прочности породы под действием переменной во времени нагрузки. Рассмотрены теоретические аспекты кинетики процесса разрушения пород вокруг выработки. Дана методика расчёта движения фронта хрупкого разрушения и деформаций пород в результате дилатансионных процессов в зоне разрушения. Методика может быть использована для составления нормативных документов при проектировании выработок.

Ключевые слова: горное давление, выработка, запредельное поведение пород, дилатансия, фронт хрупкого разрушения, кинетика деформаций, разупрочнение пород, скорость смещений.

1 Актуальность и задачи исследований

Закономерности развития во времени (кинетика) процессов разрушения и деформирования пород вокруг горной выработки давно стали объектом исследований в горной геомеханике, чему посвящены многочисленные обзоры [1–3 и др.]. Ранее учёт времени при расчёте проявлений горного давления (ПГД) производили в основном эмпирически по данным практики, что приводило к ошибкам при проектировании и ведении горных работ. На смену эмпирическим пришли математические подходы, которые с целью учёта развития ПГД во времени основывались на привлечении реологических моделей и теорий ползучести. Однако эти модели оказались малоэффективными, так как они пригодны лишь для описания временных процессов в массиве до момента начала разрушения пород, после которого все решения становятся некорректными.

Следует отметить, что на существующем этапе перехода от эмпирических моделей к аналитическим целый класс задач горной геомеханики о развитии ПГД во времени пытались решить с привлечением простой, но явно ошибочной математической модели. Последняя основана на описании процессов ползучести и релаксации в однородном неизменном континууме, которым ус-

ловно заменяли массив горных пород, считая стабильно неизменными все его механические показатели (упругие, реологические, прочностные, деформационные и др.).

На самом деле, как показывают результаты выполненных долговременных шахтных инструментальных наблюдений за проявлениями ПГД в горных выработках, временные процессы смещений пород в выработанное пространство всегда оказывались следствием местных или региональных разрушений горных пород, в процессе которых они меняли своё структурное строение и механические свойства.

Чтобы преодолеть это принципиальное противоречие и перейти от ошибочной к более адекватной математической модели, следует привлечь хотя и более сложную, но корректную, физически обоснованную и принципиально новую методику, основанную на учёте и описании процессов деформации в зависимости от законов разрушения пород во времени.

Именно такая модель в полной мере способна учесть временные процессы разрушения и деформирования пород с одновременным переходом их в другое (разрушенное) структурное состояние, что сопровождается коренным изменением их исходных механических свойств.

Использование предлагаемой математической модели описания временных процессов ПГД позволит существенно расширить пределы применения аналитических методов в горной геомеханике и заметно повысить достоверность прогноза ПГД, что важно при планировании, проектировании и ведении горных работ.

Цель исследований — разработка научных основ кинетики деформирования и разрушения горных пород вокруг выработок.

Идея работы состоит в использовании закономерностей изменения прочности во времени для описания кинетики деформационных процессов вокруг выработки при развитии вокруг неё зоны запредельных деформаций.

Объектом исследований является процесс проявлений ПГД вокруг горных выработок, **предмет** исследований — закономерности кинетики развития зон запредельных деформаций (ЗЗД) и разрушения пород во времени.

Исходя из поставленной цели, требуется решить следующие задачи исследования:

- рассмотреть и исследовать феномен длительной прочности горных пород;
- выбрать и обосновать математическую модель снижения прочности горных пород во времени;
- разработать метод учёта длительной прочности и теоретические зависимости кинетики развития ЗЗД вокруг выработки;
- выполнить анализ полученных результатов и определить направления дальнейших исследований.

2 Закономерности изменения длительной прочности горных пород во времени

Как было установлено ранее [4, 5], начальные стадии процесса разрушения, связанные с зарождением и ростом трещин во времени, можно описать кинетическими теориями разрушения. Данные теории рассматривают разрушение материалов как процесс разрыва внутренних несущих связей в материале. Его скорость определяется температурой и действующим уровнем

напряжений, т. е. имеет явно кинетический (зависимый от времени) характер. Основы кинетической теории разрушения были заложены школой академика С. Н. Журкова (50 гг. XX столетия) [4].

Ранее в представлениях о прочности доминировала механическая концепция. Считалось, что разрушение — чисто силовое явление, наступающее, когда прикладываемое к телу напряжение достигало критической величины — «предела прочности». Этой величине придавался смысл физической характеристики материала. Впоследствии были получены экспериментальные данные, свидетельствующие о влиянии на прочность скорости нагружения, длительности пребывания тела под нагрузкой, температуры. В рамках механической концепции эти данные безуспешно пытались объяснить влиянием коррозии.

Проведённое Н. С. Журковым систематическое изучение долговечности различных материалов установило экспоненциальное падение долговечности с ростом нагрузки и температуры [4]. Это позволило вскрыть физическую природу разрушения, показать, что оно обусловлено тепловыми флуктуациями, разрывающими напряжённые межатомные связи и приводящими к разрушению тела во времени.

Наиболее известным уравнением долговечности материалов при растяжении является уравнение С. Н. Журкова:

$$\tau_p = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma_0}{kT}\right), \quad (1)$$

где τ_0 — постоянная, близкая к периоду колебаний атомов ($\tau_0 \approx 10^{-13}$ с);

U_0 — энергия активации процесса термодеструкции (разрушения связей из-за термофлуктуаций энергии), Дж;

γ — параметр, имеющий смысл активационного объёма материала, где происходит разрушение, составляет $10^3 \dots 10^4$ атомных объёмов;

kT — мера энергии тепловых флуктуаций как произведение постоянной Больц-

мана $k=1,38 \cdot 10^{23}$ Дж/К на абсолютную температуру тела T , К.

Из уравнения (1) следует, что прочность материала явно зависит от времени действия нагрузки t , что показано пунктирной линией на рисунке 1. За время t_p нагружения, например на прессе, образец разрушится при уровне напряжений σ_d .

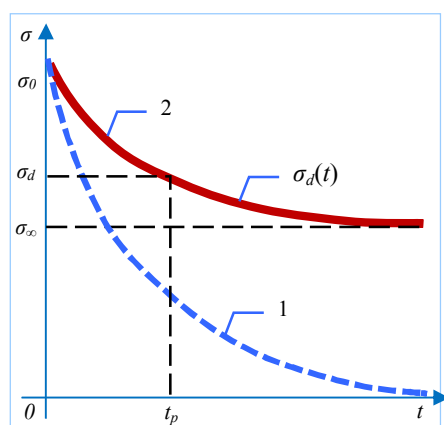


Рисунок 1 Зависимость прочности материалов $\sigma_d(t)$ от времени действия нагрузки t :
1 — по уравнению (1); 2 — для реальной породы

Из уравнения (1) следует, что даже ничтожно малая нагрузка приводит к неминуемому разрушению любого материала (пунктирная линия 1 на графике, рис. 1). Однако это противоречит опыту и практике: на самом деле график длительной прочности $\sigma_d(t)$ имеет явную асимптоту в виде предела длительной прочности σ_∞ .

Пределом длительной прочности σ_∞ считаем такой уровень напряжений, ниже которого разрушения материала не происходит, как бы долго они ни действовали. Обычно значение длительной прочности σ_∞ для горных пород колеблется в пределах:

а) для слабых глинистых или мерзлых грунтов $\sigma_\infty = (0,1 \dots 0,4) \cdot \sigma_0$;

б) для слабых и пластичных пород $\sigma_\infty = (0,3 \dots 0,7) \cdot \sigma_0$;

в) для пород средней прочности и крепких $\sigma_\infty = (0,7 \dots 0,9) \cdot \sigma_0$.

Если нагрузка будет меньше предела длительной прочности σ_∞ материала, то его разрушение не наступит никогда. Отсюда следует, что кинетическую теорию прочности в виде уравнения (1) нельзя использовать для реальных материалов. Она нуждается в существенной корректировке путём учёта не только зарождения (1), но и залечивания микродефектов [6].

На практике для расчётов ПГД нам достаточно использовать более простые и экспериментально оправданные формулы. Сформулируем требования, которым они должны отвечать:

– зависимость длительной прочности любого материала (горной породы) $\sigma_d(t)$ от времени должна быть монотонной убывающей функцией с горизонтальной асимптотой, равной пределу σ_∞ при $t \rightarrow \infty$;

– при времени нагружения, соответствующем обычному испытанию (в пределах минут), т. е. с обычными скоростями лабораторных прессов, полученный показатель прочности можно считать условно мгновенным значением прочности σ_0 ;

– функция должна иметь минимальное число параметров, чтобы с достаточной достоверностью описать изменение прочности во времени для разных классов материалов (хрупких, пластичных, различно структурно нарушенных и др.).

Теоретически обоснуем уравнение длительной прочности, для чего найдём вид функциональной зависимости длительной прочности от времени, отвечающей выдвинутым требованиям. Пусть скорость снижения прочности во времени $\sigma_d = d\sigma_d/dt$ прямо пропорциональна приложенному напряжению, что можно записать в виде дифференциального уравнения:

$$\frac{d\sigma_d}{dt} = -\frac{1}{t_0}(\sigma_d - \sigma_\infty), \quad (2)$$

где t_0 — реологическая постоянная материала, имеющая размерность времени.

В уравнении (2) знак минус перед правой частью равенства показывает, что скорость отрицательна, т. е. длительная прочность *снижается* во времени. Введение в правую часть постоянной σ_∞ равносильно заданию для длительной прочности σ_d асимптоты, при которой скорость $\dot{\sigma}_d \Rightarrow 0$ стремится к нулю.

Решением уравнения (2) с учётом начального условия (при $t=0$ прочность принимает значение $\sigma_d = \sigma_0$) будет:

$$\sigma_d = \sigma_\infty + (\sigma_0 - \sigma_\infty) \cdot \exp(-t/t_0). \quad (3)$$

Это уравнение широко использовалось профессором И. Л. Черняком (МГИ) при шахтных исследованиях [7]. Реологическую постоянную t_0 несложно определить из лабораторных испытаний пород, если измерить время разрушения породы t_1 при её нагружении постоянным напряжением σ_1 . Подставляя известные σ_1 и t_1 в (3), получим искомое значение показателя для данной породы:

$$t_0 = t_1 \cdot \ln \frac{\sigma_0 - \sigma_\infty}{\sigma_1 - \sigma_\infty}. \quad (4)$$

3 Обобщение закономерностей длительной прочности

Обобщим уравнение длительной прочности (3), записав исходное дифференциальное уравнение (2) в более общем виде как степенную функцию. Для упрощения преобразований введём относительные переменные:

$$s = \sigma_d / \sigma_\infty; \tau = t / t_0. \quad (5)$$

Тогда в этих переменных обобщённое дифференциальное уравнение длительной прочности примет следующий вид:

$$\frac{ds}{d\tau} = -(s-1)^\alpha, \quad (6)$$

где α — параметр нелинейности скорости длительной прочности, $\alpha \geq 0$.

Это дифференциальное уравнение с учетом того же, что и ранее, начального условия в новых переменных (когда $\tau = 0$,

прочность принимает значение $s = s_0$) имеет следующее решение:

$$s = 1 + [\beta\tau + (s_0 - 1)^{-\beta}]^{-1/\beta}, \quad (7)$$

где введено новое обозначение $\beta = \alpha - 1$, $\beta > -1$.

Возвращаясь с помощью (5) от относительных $s = \sigma_d / \sigma_\infty$; $\tau = t / t_0$ к исходным переменным σ_d, σ_0, t_0 , окончательно для определения длительной прочности получим формулу:

$$\sigma_d(t) = \sigma_\infty \left\{ 1 + \left[\beta \frac{t}{t_0} + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_\infty} - 1 \right)^{-\beta} \right]^{-\frac{1}{\beta}} \right\}. \quad (8)$$

Если при заданном постоянном напряжении σ необходимо определить долговечность породы t_d , то из формулы (8) получаем значение времени до разрушения:

$$t_d(\sigma) = \frac{t_0}{\beta} \left[\left(\frac{\sigma}{\sigma_\infty} - 1 \right)^{-\beta} - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_\infty} - 1 \right)^{-\beta} \right]. \quad (9)$$

При значении $\beta = 0$ (или, что то же, $\alpha = 1$) уравнение (6) вырождается в уравнение (2) и имеет особое решение (3), т. е. полученное уравнение длительной прочности (8) действительно является обобщением уравнения (3). Это расширяет возможности описания длительной прочности горных пород и других материалов.

На графиках рисунка 2 видно, как изменяется кривая длительной прочности при варьировании параметра нелинейности $0 \leq \beta < \infty$. Эти кривые различаются весьма значительно, что позволяет при проведении шахтных инструментальных наблюдений и лабораторных испытаний горных пород повысить достоверность описания временных процессов ПГД в выработке.

Как показывают предварительные теоретические оценки, параметр нелинейности может реально изменяться в пределах $0 \leq \beta < 3$, постепенно возрастая по мере уменьшения хрупкости и увеличения вязко-

пластических свойств пород. Однако ввиду скудности экспериментальных данных по изучению показателей длительной прочности горных пород предложенная оценка подлежит дальнейшей опытной проверке.

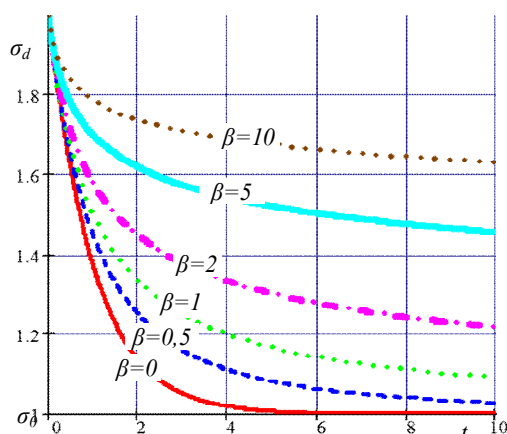


Рисунок 2 Кривые длительной прочности $\sigma_d(t)$ при изменении параметра нелинейности от $\beta = 0$, как в уравнении (1), до $\beta = 10$.

Особую сложность представляют собой задачи, когда нагрузка меняется во времени по произвольному закону и следует определить момент разрушения (долговечность материала). Как в этом случае поступить, если из лабораторных испытаний известны только параметры долговечности, полученные при действии постоянного напряжения $t_d = f(\sigma)$?

Для решения этой задачи необходимо ввести новое абстрактное понятие — **дефект долговечности**, под которым понимаем нормированную относительную меру $0 \leq \omega \leq 1$, характеризующую степень потери ресурса долговечности (повреждённости). По мере роста дефекта долговечности материал как бы исчерпывает свой ресурс «жизни» — разрушается.

Пусть нам априори или апостериори известна функциональная зависимость долговечности от **постоянного** напряжения $t_d = f(\sigma)$, представленная на рисунке 2 одной из кривых. Для решения проблемы

разобьём всю заданную кривую изменения напряжений на очень близкую к ней ломаную линию, на которой каждому элементарному приращению Δt будет соответствовать элементарный участок постоянного напряжения $\Delta \sigma$. Тогда на этом элементарном участке за время Δt возникнет элементарный дефект долговечности:

$$\Delta \omega = \frac{\Delta t}{t_d} = \frac{\Delta t}{f[\sigma(t)]}, \quad (10)$$

где $f[\sigma(t)]$ — долговечность породы при постоянном напряжении типа (3) или (8).

Эта формула представляет собой известный принцип Бейли – Робинсона суммирования повреждённостей, названный в честь учёных, которые впервые его предложили и исследовали. Для уравнения долговечности (9) получим интегральное уравнение, из которого следует определить искомое время до разрушения $t_d = f(\sigma)$, стоящее на позиции верхнего предела интеграла:

$$\int_{\omega_0}^1 d\omega = \int_{t_0}^{t_d} \frac{dt}{f[\sigma(t)]} = 1, \quad (11)$$

где ω_0 — начальная повреждённость материала при $t = t_0$;

t_0 — момент времени, когда действующее напряжение преодолело граничное значение $\sigma(t) > \sigma_\infty$.

4 Закономерности смещений пород в выработку

Развитие ПГД в горной выработке связано с описанием закономерностей смещений горных пород в выработку, которые вызваны разрушением окружающего массива горных пород во времени.

Предшествующие попытки теоретического описания кинетических закономерностей ПГД основывались на математических моделях ползучести, что обрекло их на неудачу. Для построения новой математической модели для учёта кинетических про-

цессов разрушения пород воспользуемся ранее полученными результатами о статике формирования зоны запредельных деформаций (ЗЗД) в окрестности горной выработки (рис. 4) [8]. Особенностью предложенной математической модели развития горного давления в выработке является учёт возникающей в процессе разрушения радиальной анизотропии прочности пород в ЗЗД.

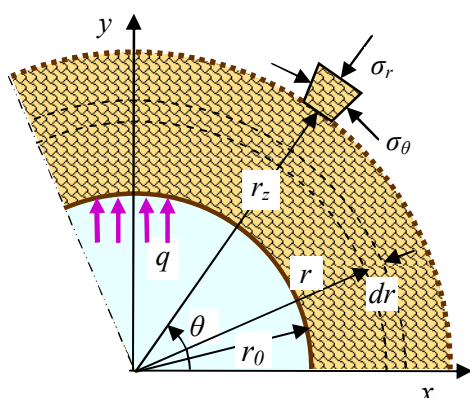


Рисунок 4 Расчетная схема задачи формирования ЗЗД вокруг выработки (показана часть круговой выработки)

В результате ранее выполненных исследований [8] были получены теоретические формулы для определения размера ЗЗД вокруг круглой выработки:

$$\rho_z = \left[\frac{2p}{(\mu+2)q} \right]^{\frac{1}{\mu}} = \left[\frac{2p - \sigma_c}{(k_\varphi + 1)q} \right]^{\frac{1}{\mu}}, \quad (12)$$

где ρ_z — относительный радиус ЗЗД, равный отношению реального радиуса ЗЗД r_z к радиусу выработки r_0 : $\rho_z = r_z / r_0$;

p — напряжённое состояние массива, равное давлению вышележащей толщи горных пород с объёмным весом γ на глубине H , $p = \gamma H$ МПа;

σ_c — показатель прочности породы на одноосное сжатие, МПа;

q — грузонесущая способность податливой крепи, установленной в выработке, МПа;

μ — коэффициент устойчивости пород вокруг выработки, определяется по формуле:

$$\mu = 2 \frac{(k_\varphi - 1)p + \sigma_c}{2p - \sigma_c}, \quad (13)$$

где k_φ — параметр угла внутреннего трения φ породы, равный:

$$k_\varphi = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi), \quad (14)$$

$$(0 \leq k_\varphi \leq 3).$$

В формуле (12) оба выражения равноправны, однако в дальнейшем мы будем использовать второе из них, где радиус ЗЗД выражен через прочностные свойства породы в явном виде.

Напряжения в окрестности выработки при образовании вокруг неё ЗЗД можно определить по формулам:

– **вне ЗЗД** для области $\rho_z \leq \rho < \infty$:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{aligned} \right\} = p \mp (p - \sigma_r^*) \cdot \rho^{-2}; \quad \tau_{r\theta} = 0; \quad (15)$$

где $\rho = r / r_0$ — относительный радиус, изменяется в пределах $\rho_z \leq \rho < \infty$;

$\rho_z = r_z / r_0$ — относительный радиус границы ЗЗД.

– **внутри ЗЗД** для области $1 \leq \rho \leq \rho_z$:

$$\sigma_r = q \rho^\mu, \quad \sigma_\theta = (\mu + 1)q \rho^\mu. \quad (16)$$

Образование вокруг выработки ЗЗД за счёт постепенного разрушения пород, которое сопровождается увеличением их объёма (дилатансией), вызывает смещения пород, направленные внутрь выработки, приводящие к уменьшению её радиуса.

При определении смещений пород учитываем дилатансионные эффекты внутри ЗЗД, вызванные разупрочнением пород и играющие первостепенную роль в деформационных процессах при ПГД.

Для расчёта радиальных деформаций пород вокруг выработки следует воспользоваться формулой [8]:

$$\varepsilon_r = \frac{d_m}{2} \rho^2 \left[1 - \frac{q}{p} \rho^\mu - \frac{\mu}{\mu + 2} \left(\frac{\rho_z}{\rho} \right)^2 \right], \quad (17)$$

где $1 \leq \rho \leq \rho_z$ — относительный радиус внутри ЗЗД с внешней границей $\rho = \rho_z$;

d_m — постоянная, равная предельному значению коэффициента разрыхления породы при её полном разупрочнении от сдвиговых деформаций, определяется экспериментально для каждого типа породы.

На основании накопленных экспериментальных данных при проведении шахтных инструментальных наблюдений для определения d_m можно предложить следующее аппроксимирующее уравнение:

$$d_m = 0,3 \cdot tg\varphi = 0,3 \cdot f, \quad (18)$$

$$(0 \leq d_m < 0,2),$$

где $f = tg\varphi$ — коэффициент внутреннего трения породы.

Полученное выражение (17) имеет достаточно простой и удобный для расчётов вид и позволяет определить радиальную деформацию пород вокруг выработки внутри ЗЗД при произвольном значении относительного радиуса ЗЗД в пределах $1 \leq \rho \leq \rho_z$.

Из формулы (17) следует, что на внешней границе ЗЗД $\rho = \rho_z$ радиальными деформациями можно пренебречь, поскольку упругая разгрузки массива и ползучесть пород дают деформации второго порядка малости по сравнению с деформациями от дилатансии внутри ЗЗД.

Таким образом, статика смещений породного контура полностью зависит от размеров ЗЗД вокруг горной выработки.

5 Кинетика ПГД в горной выработке

Задача кинетики ПГД, т. е. описания развития смещений контура выработки во времени, давно интересовала многих исследователей.

Как известно из шахтных инструментальных наблюдений, смещения пород вокруг выработки развиваются во времени и носят затухающий характер [7]. Внешне графики смещений породного контура выработки во многом напоминают графики

ползучести пород, полученные при их лабораторных испытаниях.

Вот почему ранее задачу описания смещений пород пытались получить на основе привлечения различных теорий ползучести. При этом не учитывался тот факт, что ползучесть несовместима с главным процессом при ПГД — потерей сплошности и разрушением пород, что делает использование законов ползучести некорректным.

В нашем исследовании мы отказываемся от гипотезы ползучести как главного источника деформаций и описываем процессы деформирования пород на основе изучения закономерностей развития ЗЗД вокруг выработки, когда основные смещения происходят вследствие процессов дилатансии, сопровождающих разрушение пород.

Такой подход кардинальным образом меняет не только исходную концепцию, положенную в основу решения поставленной проблемы, но и заставляет исследователей сосредоточиться на таких свойствах горных пород и других материалов, которые ранее не привлекали особенного внимания и оставались почти неизученными. Если при использовании теории ползучести пород необходимо было исследовать их свойства релаксации и ретардации при разных законах нагружения, то новый подход требует совершенно иных лабораторных исследований, связанных с изучением микромеханики и кинетики разрушения породных массивов [8].

В первую очередь это относится к таким физико-механическим показателям пород, которые требуются для адекватного описания проявлений дилатансии при разрушении и процессов изменения прочностных свойств во времени (см. разделы 2 и 3).

Решение задачи значительно усложнено тем, что следует искать решение о движении границы ЗЗД вглубь массива, обусловленном снижением длительной прочности породы в условиях переменного поля упругих напряжений перед непрерывнодвигающимся фронтом хрупкого разрушения (ФХР) вокруг выработки.

Задача описания кинетики ПГД в горной выработке состоит в определении параметров движения ФХР вглубь массива за счёт снижения длительной прочности пород в окрестности выработки и вычисления вызванных этим процессом их деформаций и смещений в выработку.

Можно предложить такой путь решения этой задачи. Опираясь на основные соотношения и зависимости, полученные при решении задачи статики ПГД вокруг выработки (см. п. 4), мы можем найти частную производную безразмерного радиуса ЗЗД ρ_z по длительной прочности горных пород σ_d :

$$\frac{\partial \rho_z}{\partial \sigma_d} = \frac{\partial}{\partial \sigma_d} \left[\frac{2p}{(\mu(\sigma_d) + 2)q} \right]^{\frac{1}{\mu(\sigma_d)}}, \quad (19)$$

$$\text{где } \mu(\sigma_d) = 2 \frac{(k_\phi - 1)p + \sigma_d}{2p - \sigma_d} \text{ из (13).}$$

Как видим, получается достаточно сложное дифференциальное уравнение. Далее находим скорость изменения длительной прочности горных пород σ_d по времени, используя уравнение длительной прочности (8):

$$\frac{\partial \sigma_d}{\partial t} = \frac{\sigma_\infty}{t_0} \left[\frac{\sigma_d}{\sigma_\infty} - 1 \right]^{\beta+1}. \quad (20)$$

Перемножая левые и правые части уравнений (19) и (20), получим искомое дифференциальное уравнение для отыскания зависимости радиуса ЗЗД от времени, т. е. кинетику движения ФХР вокруг выработки:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_z}{\partial t} = & \frac{\sigma_\infty}{t_0} \left[\frac{\sigma_d}{\sigma_\infty} - 1 \right]^{\beta+1} \times \\ & \times \frac{\partial}{\partial \sigma_d} \left[\frac{2p}{(\mu(\sigma_d) + 2)q} \right]^{\frac{1}{\mu(\sigma_d)}}. \end{aligned} \quad (21)$$

Полученное дифференциальное уравнение характеризует скорость движения

ФХР и после интегрирования позволит найти все особенности кинетики развития ПГД вокруг выработки. Однако это уравнение не удаётся решить в квадратурах из-за присущей ему сильно выраженной нелинейности. Более того, даже если это было бы возможно, итоговое решение оказалось бы слишком сложным и труднообозримым, что полностью нивелирует его практическое применение в расчётах при проектировании горных выработок.

Следовательно, необходимо использовать иной подход, пусть даже не вполне корректный с теоретических позиций, но удобный для получения практически применимых формул. Для этого воспользуемся аналитико-экспериментальным методом описания сложных природных процессов, к которым, безусловно, принадлежат и ПГД.

Сущность аналитико-экспериментального метода решения задачи состоит в том, что на первом этапе выбирают и обосновывают идеализированную теоретическую модель изучаемого процесса и с её помощью получают теоретически корректное решение в виде формул, верно отражающих структурные связи между основными влияющими параметрами.

На втором этапе исследований производят корректировку теоретических зависимостей с помощью эмпирических коэффициентов, полученных путём обработки накопленных экспериментальных данных, добиваясь максимального соответствия расчётов опытным данным при минимальном количестве поправочных коэффициентов. Тем самым удаётся достигнуть упрощения конечных расчётных формул при вполне удовлетворительном уровне их достоверности, при этом компенсируются принятые на первом этапе идеализации и допущения.

Придерживаясь данной методики, примем в качестве базовой модели процесса полученные теоретические формулы (12)–(17) для вычисления деформаций пород в горную выработку. Развитие смещений будет происходить за счёт движения ФХР вокруг выработки, что приводит к росту размеров

(радиуса) ЗЗД. При этом на границе ФХР всегда соблюдается условие предельного состояния, т. е. перехода породы от упругого состояния к началу разрушения и запрещенному деформированию.

Процесс предельного перехода породы из упругого в запредельное состояние зависит от всей предыстории нагружения породы во времени, т. е. в конечном счёте — от скорости движения ФХР, которая, в свою очередь, зависит от степени уменьшения прочности породы во времени перед ФХР.

Следовательно, можно принять в качестве рабочей гипотезы постулат, что движение границы ЗЗД можно описать, используя в формуле (12) переменную во времени прочность горной породы согласно зависимостям (8) и (9).

В этом случае мы получим искомое решение в виде простой формулы:

$$\rho_z(t) = \left[\frac{2p}{[\mu(t) + 2]q} \right]^{\frac{1}{\mu(t)}}, \quad (22)$$

где коэффициент устойчивости пород $\mu(t)$ становится явно зависимым от времени t через длительную прочность $\sigma_d(t)$ по формуле (8):

$$\mu(t) = 2 \frac{(k_\phi - 1)p + \sigma_d(t)}{2p - \sigma_d(t)}. \quad (23)$$

Чтобы получить формулу для определения радиальных деформаций пород вокруг горной выработки, необходимо в (17) подставить функцию (22), что даёт:

$$\varepsilon_r(t) = \frac{d_m}{2} \rho^2 \times \left[1 - \frac{q}{p} \rho^\mu - \frac{\mu}{\mu + 2} \left(\frac{\rho_z(t)}{\rho} \right)^2 \right], \quad (24)$$

где $1 \leq \rho \leq \rho_z(t)$ — относительный радиус внутри ЗЗД с внешней границей $\rho_z(t)$, которая в виде ФХР растёт во времени t .

Если текущий относительный радиус равен $\rho = 1$, то мы получим изменение во

времени радиальных деформаций $\varepsilon_r(t)$ на контуре выработки.

Первый этап аналитико-экспериментального метода завершён. На втором этапе, чтобы согласовать расчётные теоретические результаты с данными шахтных инструментальных наблюдений, необходимо подобрать реологические параметры t_0, β в формуле (8) для описания длительной прочности $\sigma_d(t)$.

Целесообразно для этого накопить данные шахтных наблюдений за развитием деформаций пород вокруг горных выработок в различных горно-геологических условиях. Затем обработать данные методом наименьших квадратов и определить искомые параметры t_0, β , которые будут заметно отличаться от реологических параметров, полученных путём непосредственных лабораторных испытаний разных горных пород. Этим различием натурных и лабораторных реологических параметров t_0, β будут компенсированы основные несоответствия идеальной и натурной моделей временных процессов в горной выработке.

Выполним анализ полученных зависимостей, чтобы убедиться в их возможности достаточно полно описать деформационные процессы ПГД в выработке.

В качестве примеров для численных расчётов возьмём средние для Донбасса горно-геологические условия, в которых на глубине $H = 600 \dots 800$ м пройдена горизонтальная выработка с относительным радиусом $\rho = 1$.

Породный массив представлен алевролитами с объёмным весом $\gamma = 25$ КПа/м и с длительной прочностью, которая описывается реологическим уравнением (8) со следующими параметрами:

– прочности на одноосное сжатие: мгновенная $\sigma_0 = 45$ МПа и длительная $\sigma_\infty = 25$ МПа;

– реологическая постоянная $t_0 = 7$ сут.;

– параметр нелинейности $\beta = 0,5$.

На первом этапе произведём численную оценку временной задержки разрушения

пород в выработке после её проходки, что представляет практический интерес. Исходя из формулы (8), возможны три случая разрушения пород на контуре выработки во времени:

1) если начальные напряжения σ_θ меньше длительной прочности породы $\sigma_\theta < \sigma_\infty$, то разрушения не наступает и контур выработки устойчив;

2) в случае, когда $\sigma_\theta > \sigma_0$, происходит немедленное разрушение контура и формирование ЗЗД на соответствующую глубину;

3) при соблюдении на породном контуре соотношения $\sigma_0 > \sigma_\theta < \sigma_\infty$ он начинает разрушаться после окончания инкубационного периода накопления дефектов в породе, длительность которого можно найти по формуле (9).

На рисунке 5 можно проследить, как изменяется относительное время $\tau = t/t_0$ до разрушения породного контура в зависимости от напряжений на контуре, отнесённых к длительной прочности пород $s = \sigma_\theta / \sigma_\infty$, когда соотношение между мгновенной σ_0 и длительной σ_∞ прочностями пород равно $\sigma_0 / \sigma_\infty = 1,4$. Графики приведены для разных значений параметра нелинейности в пределах $0,1 \leq \beta \leq 2$, который значительно (в разы) влияет на начало разрушения пород.

После начала разрушения породного контура начинается рост ЗЗД вглубь массива во времени, что описывается формулой (22). На рисунке 6 показаны характерные графики изменения во времени радиального перемещения ФХР по мере углубления расположения выработки ($H = 600, 700$ и 800 м).

Относительный радиус ЗЗД изменяется весьма заметно: по мере увеличения глубины от 1,8 до 2,5 и 3,3, т. е. значительно быстрее, чем рост глубины. Также по мере возрастания глубины существенно уменьшается и время $\tau = t/t_0$ начала разрушения породного контура, которое составляет 1, 0,5 и 0,2 t_0 , или при $t_0 = 7$ сут время начала разрушения составляет 7, 3,5 и 1,5 сут.

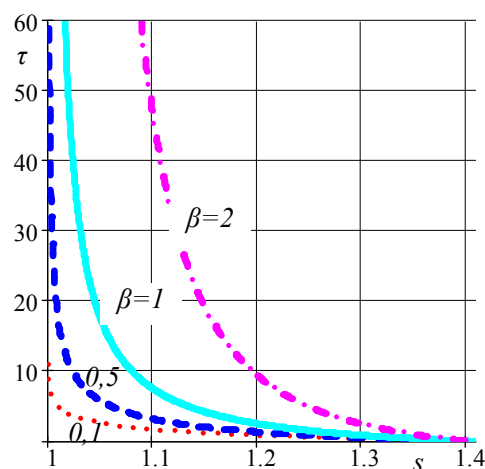


Рисунок 5 Зависимость времени $\tau = t/t_0$ до разрушения пород на контуре выработки от уровня действующих напряжений $s = \sigma_\theta / \sigma_\infty$

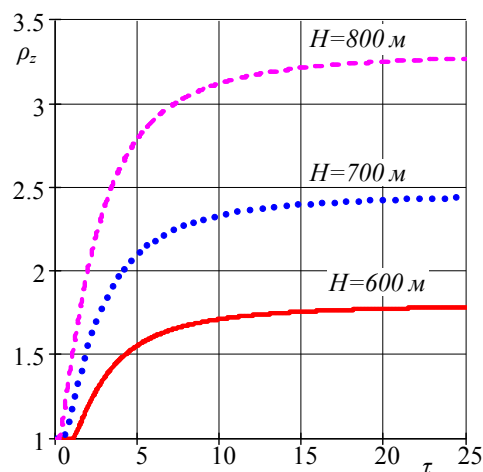


Рисунок 6 Рост относительного радиуса ЗЗД $\rho_z = r_z / r_0$ вокруг горной выработки во времени, который выражен в относительных долях от реологического параметра $\tau = t/t_0$

Наиболее важным показателем, характеризующим степень устойчивости горной выработки, считается радиальная деформация её породного контура. Для её определения воспользуемся формулой (24) и произведём численные расчёты для разных глубин расположения выработки. На рисунке 7 даны графики радиальных деформаций в виде их зависимости от относительного времени после удаления проходческого за-

боя от фиксированного сечения горной выработки. Теоретически полученные результаты вполне удовлетворительно совпадают с данными многочисленных шахтных инструментальных наблюдений на замерных станциях, установленных в подготовительных горных выработках [7, 9].

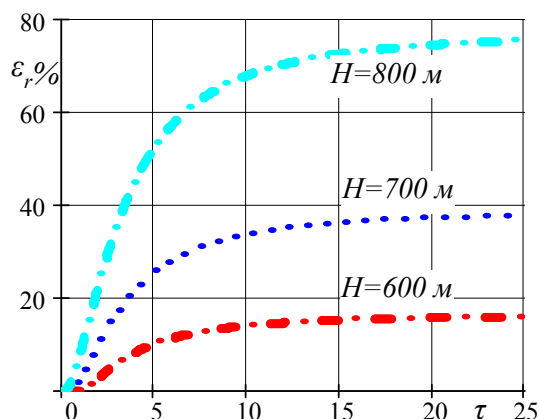


Рисунок 7 Графики возрастания радиальных смещений ε_r % породного контура выработки в зависимости от относительного времени τ на разных глубинах H разработки

Следует заметить, что начальный участок этих графиков в отличие от теоретических расчётов будет несколько растянут во времени из-за сдерживающего влияния проходческого забоя. Область такого влияния забоя выработки распространяется на длину порядка 3–4 радиусов выработки и мало влияет на конечные смещения пород, что позволяет её пренебречь.

Выводы

Таким образом, поставленная задача по описанию кинетики развития ПГД в горной выработке решена. Тем самым замыкается

цикл теоретических исследований по изучению развития механических процессов разрушения и деформирования горных пород при сооружении горных выработок.

Новизна полученных результатов состоит в следующем:

1) установлено, что основной вклад в кинетику процессов ПГД вносит изменение прочности пород вокруг выработки во времени на границе ФХР;

2) исследованы закономерности снижения длительной прочности пород во времени не только при постоянном, но и при переменном поле напряжений;

3) получены обобщённые формулы для описания снижения прочности пород во времени при произвольной внешней нагрузке за счёт введения понятия роста дефектов долговечности материала;

4) разработана новая расчётная модель кинетики движения ФХР в окрестности горной выработки;

5) впервые предложены расчётные алгоритмы определения изменения во времени размеров ЗЗД и радиальных деформаций пород вокруг выработки, что позволяет перейти к разработке нормативных документов по прогнозу устойчивости выработки во времени.

Задачей дальнейших исследований являются обоснование и разработка методов учёта неосесимметричных факторов, способных существенно уточнить исходную расчётную схему порождающего решения. Это в конечном счёте позволит перейти к созданию аналитического метода прогноза ПГД с учётом реальных горно-геологических условий сооружения и эксплуатации горной выработки.

Библиографический список

1. Работнов, Ю. Н. Ползучесть элементов конструкции [Текст] / Ю. Н. Работнов. — М. : Наука, 1966. — 753 с.
2. Безухов, Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести [Текст] / Н. И. Безухов. — [2-е изд.]. — М. : Высшая школа, 1968. — 512 с.
3. Малинин, Н. И. Прикладная теория пластичности и ползучести [Текст] / Н. И. Малинин. — М. : Машиностроение, 1968. — 400 с.

4. Журков, С. Н. Кинетическая концепция прочности твёрдых тел [Текст] / С. Н. Журков. — Вестник АН СССР. — 1968. — № 3. — С. 46–52.
5. Регель, В. Р. Кинетическая природа прочности твёрдых тел [Текст] / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. — М. : Наука, 1974. — 560 с.
6. Литвинский, Г. Г. Аналитическая теория прочности [Текст] / Г. Г. Литвинский. — Донецк : Норд-Пресс, 2008. — 207 с.
7. Черняк, И. Л. Повышение устойчивости подготовительных выработок [Текст] / И. Л. Черняк. — М. : Недра, 1993. — 256 с.
8. Литвинский, Г. Г. Статика разрушения и деформирования пород вокруг горной выработки [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2017. — Вып. 7 (50). — С. 19–30.
9. Jovanović, P. Projektovanje i proračun podgrade horizontalnih podzemnih prostorija [Text]. T. 2. / Petar Jovanović. — Beograd : Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta, 1994. — 316 str.

© Литвинский Г. Г.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СЗПСиГМ ДонНТУ Борщевским С. В.
к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Мележиком А. И.**

Статья поступила в редакцию 01.06.18.

проф. Литвинський Г. Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

КІНЕТИКА РУЙНУВАННЯ І ДЕФОРМУВАННЯ ПОРІД НАВКОЛО ГІРСЬКОЇ ВИРОБКИ

Запропоновано математичну модель кінетики деформування порід на основі використання залежних від часу процесів їх руйнування. Проведено теоретичні дослідження законів зміни міцності породи під дією змінного в часі навантаження. Розглянуто теоретичні аспекти кінетики процесу руйнування порід навколо виробки. Дана методика розрахунку руху фронту крихкого руйнування та деформацій порід в результаті ділатансійних процесів в зоні руйнування. Методика може бути використана для розробки нормативних документів при проектуванні виробок.

Ключові слова: гірський тиск, виробка, позамежна поведінка порід, ділатансія, фронт крихкого руйнування, кінетика деформацій, дефектність порід, швидкість зсуву порід.

Prof. Litvinsky G. G. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

KINETICS OF ROCKS DESTRUCTION AND DEFORMATION AROUND MINING EXCAVATION

A mathematical model of rock deformation kinetics is proposed by using of temporary processes of their destruction. Theoretical studies of the laws on changing in rock strength under the influence of time-varying load are carried out. Theoretical aspects of the kinetics of the rock destruction process around the mine are considered. A technique is given for calculating the motion of the brittle fracture front and rock deformations as a result of dilatancy processes in the fracture zone. The methodology can be used to compile normative documents when designing excavations.

Key words: rock pressure, mining excavation, post ultimate rock behavior, dilatancy, brittle fracture front, kinetics of deformations, loss of rocks strength, displacement speed.

УДК 622.261

к.т.н. Смекалин Е. С.,
д.т.н. Полозов Ю. А.,
д.т.н. Спичак Ю. Н.,
д.э.н. Гришко Н. В.,
д.э.н. Коваленко Н. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ГОРНОПРОХОДЧЕСКИХ РАБОТ С УЧЁТОМ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ПРИРОДЫ ИХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Предложен подход для определения продолжительности горнопроходческих работ, который позволяет получить скорректированные плановые задания для проходческих бригад с учётом вероятностной природы их организационно-технологической структуры и условий производства. Приведена методика проектирования графиков организации работ в проходческом забое с учётом стохастических параметров потерь рабочего времени и продолжительности посторонней работы, характерных реальным условиям.

Ключевые слова: проходческий цикл, график организации работ, потери рабочего времени, посторонняя работа, надёжность, вероятностная оценка продолжительности и трудоёмкости работ, эффективность горнопроходческих работ.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Горнопроходческие работы, в соответствии с определением «Горной энциклопедии» [1], представляют собой комплекс работ по проведению подземных горных выработок для различных целей. Данный комплекс включает в себя совокупность основных и вспомогательных горнопроходческих процессов, а также обеспечивающих и обслуживающих работ, взаимосвязанных друг с другом изменчивыми отношениями и связями, реализуемых в массиве горных пород, свойства которого имеют случайный характер, что позволяет классифицировать их как вероятностную многоуровневую технологическую систему.

Технологическую систему горнопроходческих работ обычно рассматривают на уровнях комплекса выработок (для отдельной лавы, горизонта, панели) и работ, выполняемых в отдельном проходческом забое, причём эти уровни взаимосвязаны — комплекс выработок состоит из отдельных забоев [2]. При этом технико-экономические показатели принято рассчитывать и назначать как детерминированную величину, что про-

тиворечит природе горнопроходческих работ как организационно-технической системы.

Традиционно плановые задания для проходческих бригад устанавливают с фиксированной продолжительностью комплекса работ, определяемой по действующим нормативным данным. Однако при текущем уровне организации и снабжения горнопроходческих работ, в силу наличия потерь рабочего времени и посторонних работ, таких показателей на практике достичь невозможно.

Разработка новой системы нормативов, соответствующих реалиям производства горнопроходческих работ, является весьма трудоёмкой и дорогостоящей задачей. Альтернативой данному подходу является корректировка идеализированной организационно-технологической структуры горнопроходческих работ на величину потерь рабочего времени. Данную структуру можно разработать на основании аналитических расчётов, экономико-математических моделей, или даже используя старые нормативные данные, а продолжительность потерь времени и посторонней работы можно оценить с использованием методов теории вероятности.

Постановка задачи. Задачей данной работы является обоснование методики определения плановой продолжительности горнопроходческих работ с учётом вероятностной природы их организационно-технологической структуры и условий их производства.

Изложение материала и его результаты. На первом этапе исследования рассмотрим способы разработки организационно-технологической структуры горнопроходческих работ в детерминированном виде, а далее — скорректируем полученный результат с использованием вероятностных параметров изменчивых условий производства работ и потерь рабочего времени по ряду причин организационного и технического характера.

В данной работе будем рассматривать горнопроходческую систему, ограниченную пределами одиночной выработки, в которой выполняются основные и вспомогательные процессы, увязка которых во времени и пространстве может быть представлена в виде технологических схем. Объектом исследования примем проходческий цикл, который состоит из ряда повторяющихся в определенной последовательности рабочих процессов.

Наиболее прогрессивным методом организации горнопроходческих работ является использование поточной технологической схемы, которая реализуется в городском подземном строительстве при использовании отдельных типов щитовых комплексов. При поточной схеме все основные технологические процессы совмещены во времени и практически выполняются непрерывно. Реализация поточной технологии требует использования современной дорогостоящей проходческой техники, бесперебойного материально-технического снабжения и высокого уровня квалификации рабочих, трудовой дисциплины и организации труда. В настоящее время на угольных шахтах Донбасса, ввиду недостатка финансирования, из перечисленных условий можно реализовать только лишь директивный метод и обеспечить трудовую дисциплину, поэтому использование поточной технологии при

проходке горных выработок на данном этапе нереализуемо.

Альтернативой поточной технологии является традиционное цикличное производство работ в проходческом забое, при котором основные процессы осуществляются с перерывами, в строгой очередности друг за другом, либо с определённой степенью совмещения со вспомогательными работами.

Проходческий цикл, с организационно-технологической точки зрения, принято характеризовать тремя основными показателями: величиной заходки (подвиганием забоя за цикл), его продолжительностью и трудоёмкостью работ. Величину заходки при применении рамных конструкций крепи принимают кратной расстоянию между рамами с учётом устойчивости породного массива, возможностей бурового оборудования и требований Правил безопасности (не более 3 м).

Продолжительность цикла для упрощения организации работ стараются принимать равной (или кратной) продолжительности рабочей смены, её определение основано на использовании нормативных значений времени или затрат труда (норма выработки) либо различных экономико-математических моделей.

Результатом проектирования проходческого цикла в графическом виде является линейный график организации работ в забое, который отражает продолжительность и распределение основных и вспомогательных процессов во времени с обязательным указанием количества рабочих, занятых на их выполнении. Составление графика организации горнопроходческих работ позволяет анализировать их структуру и оптимизировать использование рабочего времени и трудовых ресурсов.

При проектировании горнопроходческих работ используют последовательную и параллельную схемы организации работ проходческого цикла. Параллельная схема подразумевает полное или частичное совмещение во времени процессов. Наибольшее распространение получил цикл с частичным совмещением рабочих процессов (рис. 1).

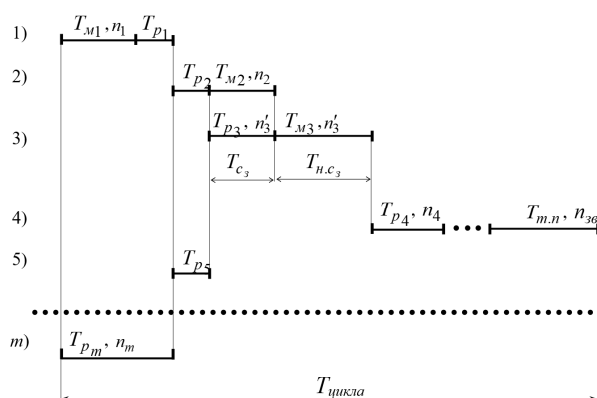


Рисунок 1 Структура проходческого цикла с частичным совмещением рабочих процессов

При проектировании структуры проходческого цикла все основные и вспомогательные процессы должны быть разделены на две группы:

- несовмещаемые (определяют продолжительность проходческого цикла);
- совмещаемые во времени с процессами первой группы и между собой.

У основных процессов необходимо выделять механизированные и ручные части, так как их продолжительности T_{m_i} и T_{p_i} определяются либо через объём работ W_i и техническую производительность машин Q_{m_i} , либо через трудоёмкость работ N_i и число выполняющих их проходчиков n_i :

$$\begin{aligned} T_{m_i} &= W_i / Q_{m_i}, \\ T_{p_i} &= N_i / n_i. \end{aligned} \quad (1)$$

Очередность выполнения процессов обусловлена логической сущностью технологии работ, а возможность их совмещения устанавливается путём пооперационного анализа каждого процесса. Так, для обеспечения безопасности проходчиков в ограниченном призабойном пространстве машинные части процессов обычно не совмещаются между собой, поэтому предельная степень их совмещения определяется возможностью выполнения ручных операций смежных процессов параллельно с ними.

Совмещение ручных процессов между собой и с машинными процессами при разделении их в пространстве практически возможно всегда, однако следует учитывать, что отдельные ручные процессы (например, зарядание и взрывание шпуров) вообще не могут быть совмещены.

При построении традиционного линейного графика организации работ (рис. 1) в первую очередь наносятся несовмещаемые процессы со строго регламентированной численностью проходчиков, а затем остальные процессы, варьируя число проходчиков, занятых на их выполнении, и совмещение их между собой и с процессами первой категории. При этом в любой момент времени смены суммарная численность рабочих на совмещаемых процессах равна численности звена.

Продолжительность проходческого цикла T_u определяется как сумма несовмещённых частей машинных и ручных процессов. Степень совмещения процессов при проектировании организации горнопроходческих работ можно задать путём их пооперационного анализа, предельное значение которого можно представить в виде коэффициента совмещения k_c , определяемого на примере третьего процесса (рис. 1) по формуле:

$$k_{c_3} = (T_3 - T_{н.с_3}) / T_3 = T_{с_3} / T_3, \quad (2)$$

где $T_{с_3}$, $T_{н.с_3}$ — совмещённая и несовмещённая части продолжительности третьего процесса T_3 .

С учётом (2) для схемы на рисунке 1 можно записать $k_{c_1} = 0$; $k_{c_2} = 0$; $k_{c_4} = 0$; $k_{сm} = 1$, а обобщая на случай i -го процесса, выражение для определения продолжительности проходческого цикла представить в виде:

$$T_u = \sum_{i=1}^m (1 - k_{c_i}) \cdot (T_{m_i} + T_{p_i}) + T_{nm}, \quad (3)$$

где T_{m_i} и T_{p_i} — продолжительности i -го машинного или ручного процесса; T_{nm} — продолжительность технологических перерывов.

Последовательная схема организации работ является частным случаем параллельной при $k_c = 0$, при которой должно соблюдаться условие равенства численности проходчиков, занятых на каждом процессе, т. е. $n_i = n_{зв}$. Данная схема характерна для малых объёмов работ и минимальной численности звена проходчиков, она является наиболее простой с организационной точки зрения, но технико-экономические показатели проходки будут минимальными. При совмещении процессов возрастает скорость проведения выработки, но увеличивается численность звена и усложняется организация работ.

Одним из основных показателей горнопроходческих работ является суммарная трудоёмкость работ проходческого цикла, которая для приведённой на рисунке 1 структуры может быть определена из выражения:

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m (N_{m_i} + N_{p_i}) + T_{n.m} \cdot n_{зв}, \quad (4)$$

где N_{m_i} — трудоёмкость работ по i -му машинному процессу, $N_{m_i} = (W_i \cdot n_i) / Q_{m_i}$; N_{p_i} — трудоёмкость i -го ручного процесса, определяемая при попроцессном проектировании через норму выработки, а при пооперационном — через нормативы затрат труда.

Расстановка проходчиков по совмещаемым и несовмещаемым работам во времени должна быть такова, чтобы суммарная величина человеко-часов на графике совпала с расчётным значением трудоёмкости N_{Σ} проходческого цикла.

Структурированная в таком виде обобщённая модель проектирования организации горнопроходческих работ позволяет однозначно определить расчётную продолжительность проходческого цикла при любой технологической схеме работ, для которых разработаны нормы выработки и времени. Однако рассчитанная по зависимости (3) продолжительность цикла является детерминированной величиной и абсолютно не учитывает вероятностный харак-

тер протекания технологических процессов и присущие им потери рабочего времени. Она является минимальной продолжительностью работ, возможной лишь в том случае, если процессы выполняются в строгом соответствии с нормативными документами и обладают абсолютной надёжностью.

При производстве горнопроходческих работ на практике, в силу воздействия различных возмущающих природных, технических и организационных факторов, происходят разнообразные потери рабочего времени, что приводит к увеличению продолжительности и трудоёмкости проходческого цикла. Простои в результате ненадёжности проходческих машин обычно учитываются путём введения в первую часть формулы (1) коэффициента готовности k_z [3]:

$$T_{m_i} = W_i / (Q_{m_i} \cdot k_{z_i}); \quad (5)$$

$$k_z = T_{н.о} / (T_{н.о} + T_{в.о}),$$

где $T_{н.о}$ — время наработки на отказ; $T_{в.о}$ — время восстановления машины после отказа.

Другие виды потерь рабочего времени, характерные как для машинных, так и для ручных работ, обычно не принимаются в расчёт при составлении проектов и плановых заданий. Хотя так называемые параметрические отказы, когда выполняются нормируемые работы, но производительность труда проходчиков на них в силу различных причин (затупление коронок, завышенная площадь поперечного сечения выработки и пр.) существенно ниже нормативного значения, по своей продолжительности могут существенно превосходить продолжительность процессов, установленную через нормативы [4].

Потери рабочего времени могут происходить в любой момент времени, поэтому структура и продолжительность проходческого цикла на практике приобретает самые разнообразные формы, одна из которых для демонстрации изображена на рисунке 2.

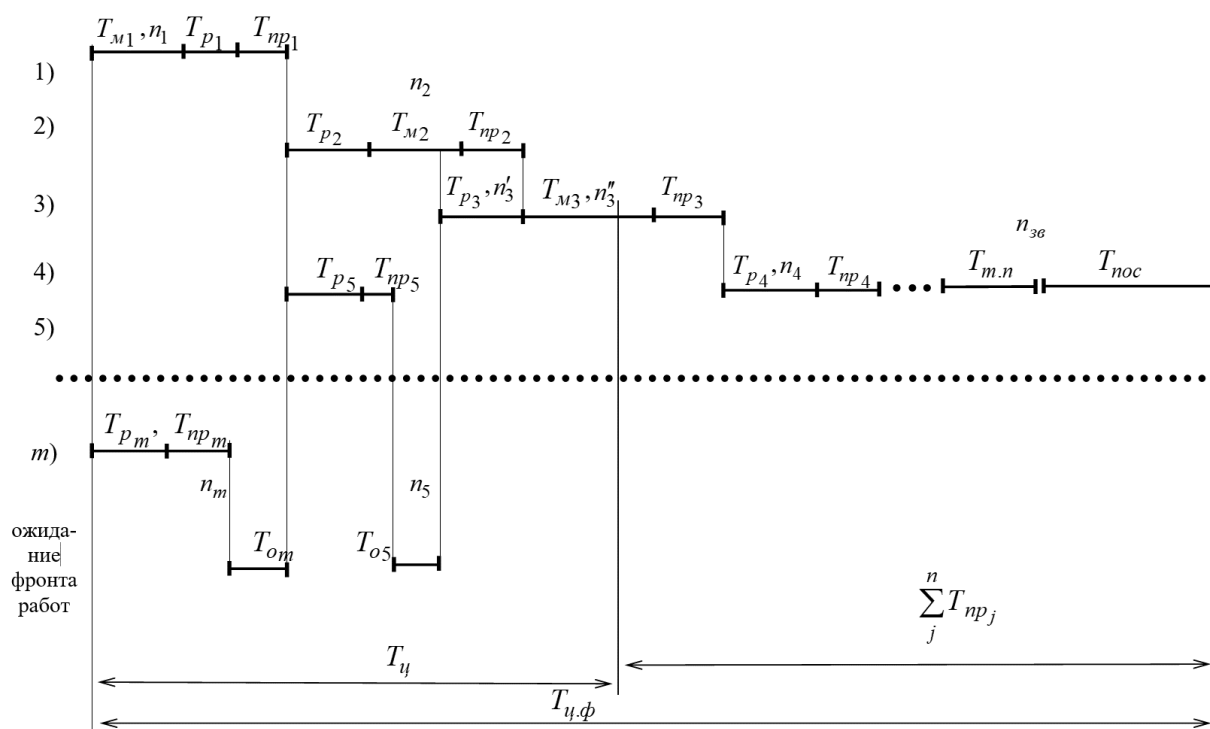


Рисунок 2 Структура проходческого цикла с учётом потерь рабочего времени

С учётом потерь рабочего времени формула для определения фактической продолжительности проходческого цикла может быть записана в виде:

$$T_{ц.ф} = \sum_{i=1}^m (T_{m_i} + T_{p_i} + T_{np_i}) \cdot (1 - k_{c_i}) + T_{n.m} + T_{noc}, \quad (6)$$

где T_{np_i} — продолжительность потерь рабочего времени по i -му процессу; T_{noc} — продолжительность выполнения посторонних работ, не предусмотренных нормативными документами для рабочих данной профессии.

Поскольку простои проходческих машин и потери рабочего времени определяют значение коэффициента готовности (5), то зависимость (6) можно представить в виде:

$$T_{ц.ф} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{k_{c_i}} T_{m_i} + \frac{1}{k_{n_i}} T_{p_i} \right) (1 - k_{c_i}) + T_{n.m} + T_{noc}, \quad (7)$$

где k_{c_i} и k_{n_i} — коэффициенты соответственно готовности оборудования и надёжности ручных процессов, представляющие собой вероятность того события, что в данный момент времени будет выполняться нормируемая работа [3].

Сравнивая схемы на рисунках 1 и 2, можно сделать вывод, что фактическая продолжительность проходческого цикла увеличивается на суммарную величину случайных потерь рабочего времени по различным причинам, т. е.:

$$T_{цф} = T_{цн} + \sum_{j=1}^n T_{np_j}, \quad (8)$$

где $T_{цн}$ — нормативная продолжительность проходческого цикла; T_{np_j} — потери рабочего времени по j -й причине, включающие организационные и технические простои, простои в результате нарушения трудовой дисциплины, потери времени из-за выполнения посторонних и непроизводительных работ.

Для оценки эффективности горнопроходческих работ более удобен относительный показатель, по своей сути подобный коэффициенту надёжности (5), используемому в технике:

$$k_3 = \frac{T_{цн}}{T_{цф}} = \frac{T_{цн}}{(T_{цн} + T_{нр} + T_{нос})} = \frac{1}{\left(1 + \sum_{j=1}^n k_j\right)}, \quad (9)$$

где $k_j = (T_{нрj} + T_{носj})/T_{цн}$ — коэффициент, характеризующий долю каждого вида потерь в общем балансе рабочего времени.

Зависимости (7, 8, 9) иллюстрируются рисунком 3, на котором фактическая продолжительность проходческого цикла представлена в виде двух частей: детерминированной нормативной и стохастической для потерь и посторонней работы. Нормативная продолжительность цикла заканчивается в момент времени t_n , однако по причине случайных потерь рабочего времени работы продолжают и заканчиваются в момент времени t . Причём нормативная продолжительность цикла также может быть описана как функция случайной величины $T_{цн}(t)$, если изменится число проходчиков, выполняющих работы, или условия производства этих работ.

Предположим, что потери рабочего времени, являясь случайной величиной, распределяются по какому-либо закону:

$$Q(t) = P\left\{\sum(T_{нр} + T_{нос}) < t\right\}, \quad (10)$$

где $Q(t)$ — вероятность завершения проходческого цикла до произвольного $t > t_n$ с непрерывной плотностью распределения $q = Q'(t)$.

Для анализа продолжительности цикла $T_{цф}$ удобнее пользоваться функцией $R(t)$, описывающей вероятную продолжительность отказов

$$R(t) = 1 - Q(t) = P\{T_{цф} > t\}, \quad (11)$$

которая является обратной функции $Q(t)$ и представляет собой вероятность того, что за время t цикл не закончится. В дальнейшем будем называть её функцией потерь рабочего времени.

Потери рабочего времени проще охарактеризовать не функцией $R(t)$, а некоторыми числовыми значениями, например, средней продолжительностью отказов T_0 , определяемой как математическое ожидание случайной величины $T_{нр}$ в случае нормального закона её распределения:

$$\begin{aligned} T_0 = MT_n &= \int_0^{\infty} t \cdot q(t) dt = \\ &= -t \cdot R(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt. \end{aligned} \quad (12)$$

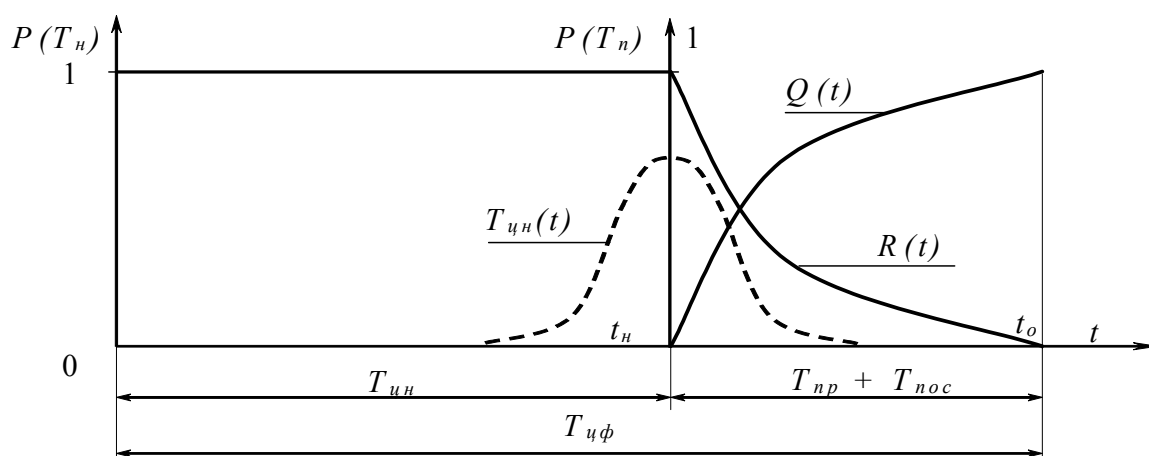


Рисунок 3 Вероятностная структура продолжительности проходческого цикла

Данное интегрирование возможно, поскольку продолжительность отказов и посторонних работ по своей природе — конечная непрерывная величина, а, следовательно, интегралы сходятся.

Другой вероятностной характеристикой потерь рабочего времени является дисперсия дополнительного времени выполнения проходческого цикла

$$DT_n = M(T_n - t_n)^2 = M(T_n^2) - (MT_n)^2 = \int_0^{\infty} t^2 \cdot q(t) dt - t_n^2 = 2 \int_0^{\infty} t \cdot q(t) dt - t_n^2, \quad (13)$$

а также его среднее квадратичное отклонение $\sigma_0 = \sqrt{DT_n}$ [5].

Использовать дисперсию как вероятностную характеристику продолжительности проходческих работ целесообразно, если случайное время T_0 имеет небольшой относительный разброс.

На основании этого фактическая продолжительность проходческого цикла представляет собой сумму его нормативной продолжительности и интеграла по времени функции продолжительности отказов (11), определяемой статистически для конкретных условий производства работ:

$$T_{цф} = T_{цн} + \int_0^{\infty} R(t) dt. \quad (14)$$

Данная зависимость (14) позволяет совместить традиционную детерминированную модель горнопроходческого цикла со

стохастической. Продолжительность потерь рабочего времени, включающая в себя продолжительность простоя проходческого забоя вследствие ряда причин (организационных, технических, горно-геологических и пр.) и посторонней работы, является случайной величиной, а нормативная продолжительность проходческого цикла $T_{цн}$ — детерминированной.

Выводы и направление дальнейших исследований. Использование приведённой методики позволяет получить фактическую продолжительность проходческого цикла и вероятностные параметры её распределения на основании моделирования структуры цикла и учёта стохастической природы потерь рабочего времени и посторонних работ. Данная модель проектирования продолжительности горнопроходческих работ позволит наиболее корректно задавать их структуру и параметры, а проводимый анализ потерь рабочего времени даст возможность наметить мероприятия для их устранения из общей продолжительности работы проходческой бригады.

При детальном представлении вероятностной структуры горнопроходческих работ нормативную продолжительность проходческого цикла (3, 14) также следует рассматривать как случайную величину, что, наряду с определением параметров распределения потерь рабочего времени для реальных условий производства работ, может составить цель дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Горная энциклопедия [Электронный ресурс] : подгот. по печ. изд. 1984–1991 гг. В 5 томах. — М. : Советская энциклопедия, Рубриконт, 2008. — Режим доступа: <http://www.mining-enc.ru/gornoproходcheskie-raboty/>. — Дата последнего обращения : 30.05.2018.
2. Бабиюк, Г. В. Многоуровневая иерархическая модель горнопроходческой системы [Текст] / Г. В. Бабиюк, Е. С. Смекалин // Науковий вісник НГУ. — Дніпропетровськ, 2007. — № 5. — С. 32–37.
3. Торбин, В. У. Надёжность и эффективность в технике [Текст] : справочник в 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем / В. У. Торбин и др. ; под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. — М. : Машиностроение, 1988. — 328 с.
4. Бабиюк, Г. В. Анализ эффективности горнопроходческих работ на шахтах Луганского региона [Текст] / Г. В. Бабиюк, Е. С. Смекалин // Проблемы горного дела и технологии горного производства. — Донецк : Вебер, 2007. — С. 65–76.

5. Микулик, Н. А. Решение задач с техническим содержанием по теории вероятностей, математической статистике и случайным процессам [Текст] : справочное пособие / сост. Н. А. Микулик, Г. Н. Рейзина. — Минск : БНТУ, 2011. — 152 с. : ил.

© Смекалин Е. С.
 © Полозов Ю. А.
 © Спичак Ю. Н.
 © Гришко Н. В.
 © Коваленко Н. В.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СЗПСиГМ ДонНТУ Борщевским С. В.,
 к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Леоновым А. А.**

Статья поступила в редакцию 06.06.18.

**к.т.н. Смекалін Є. С., д.т.н. Полозов Ю. А., д.т.н. Спичак Ю. М., д.е.н. Гришко Н. В.,
 д.е.н. Коваленко Н. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)**

ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ГІРНИЧОПРОХІДНИЦЬКИХ РОБІТ З УРАХУВАННЯМ ІМОВІРНІСНОЇ ПРИРОДИ ЇХ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СТРУКТУРИ

Запропоновано підхід для визначення тривалості гірничопрохідницьких робіт, який дозволяє отримати скориговані плани завдання для прохідницьких бригад з урахуванням ймовірнісної природи їх організаційно-технологічної структури та умов виробництва. Наведено методику проектування графіків організації робіт в прохідницькому забої з урахуванням стохастичних параметрів втрат робочого часу та тривалості сторонньої роботи, характерних реальним умовам виробництва.

Ключові слова: прохідницький цикл, графік організації робіт, втрати робочого часу, стороння робота, надійність, ймовірнісна оцінка тривалості і трудомісткості робіт, ефективність гірничопрохідницьких робіт.

**PhD Smekalin E. S., Doctor of Tech. Sc. Polozov Yu. A., Doctor of Tech. Sc. Spichak Yu. N.,
 Doctor of Economics Grishko N. V., Doctor of Economics Kovalenko N. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**
**DETERMINING THE DURATION OF MINING OPERATIONS CONSIDERING
 THE PROBABILISTIC NATURE OF THEIR ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL
 STRUCTURE**

An approach is proposed for determining the duration of mining operations, which enables obtaining corrected targets for the brigades considering the probabilistic nature of their organizational and technological structure and production conditions. The design technique for schedules of the works organization in a heading face is given considering the stochastic parameters of working time losses and duration of extraneous work specific to real conditions.

Key words: progress cycle, work schedule, working time loss, extraneous work, reliability, probabilistic estimation of work duration and labor intensity, efficiency of mining operations.

УДК 622.016+519.86

*к.т.н. Палейчук Н. Н.,**к.т.н. Князьков О. В.**(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР),**д.т.н. Спичак Ю. Н.**(АФГТ ЛНУ им. В. Даля, г. Антрацит, ЛНР)*

О ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ АСПЕКТАХ ГЕОТЕХНОЛОГИИ

Рассмотрены аспекты потенциального перспективного стратегического технико-экономического развития угледобывающей отрасли. Приведены основные типы экономических моделей угледобывающих предприятий при нисходящем и восходящем порядках отработки запасов шахтных полей. Выполнен анализ направлений повышения эффективности функционирования предприятий угольной отрасли.

Ключевые слова: *угольные запасы, потребление, добыча, конкурентоспособность, себестоимость, экономическая эффективность, комплексное освоение недр.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Последнее время угольная отрасль переживает не лучшие времена. Сокращается количество шахт, а многие действующие предприятия находятся на пороге рентабельности. Привлечение инвестиций в своё время несколько повысило экономическую стабильность шахт, однако сегодня доля частных и корпоративных инвесторов сокращается, в том числе в связи с туманными перспективами самой технологии отработки угольных запасов при переходе шахт рубежа глубины 1000 м. Поэтому является актуальным аналитическое исследование экономических аспектов перспективной геотехнологии в условиях шахт Восточного Донбасса.

Постановка задачи. Задачей аналитического исследования является определение ключевых аспектов технико-экономической эффективности работы угледобывающих предприятий и направлений повышения их конкурентоспособности в условиях снижения доли угля в топливно-энергетическом балансе.

Изложение материала и его результаты. Общие запасы угля на планете оцениваются в 860 млрд тонн. По прогнозам человечеству хватит их на 200 лет. Это солидный срок, учитывая, что запасы нефти и

газа должны истощиться гораздо раньше. Как следует из [1], динамика потребления угля в мире увеличивается и к 2030 году составит более четырёх миллиардов тонн в год. А основным драйвером этого роста выступит Азиатско-Тихоокеанский регион.

В РФ также прогнозируется увеличение добычи угля. Для России угледобыча является одной из важных составляющих экономики, так как кроме обеспечения внутренних потребностей уголь является стратегически важным экспортным сырьём. По данным энергетической стратегии до 2040 года, Россия располагает существенными ресурсами угля, значительная часть ресурса приходится на Сибирь (64 %) и Дальний Восток (30 %). Около половины добытого угля в России идёт на экспорт, в январе-декабре 2016 года было добыто 357,33 млн тонн угля (что на 1,5 % больше по сравнению с 2015 годом), экспорт российского угля в 2016 году составил 149,329 млн тонн (что на 8,3 % больше по сравнению с показателем 2015 года).

Следует отметить, что значительная часть угля в РФ добывается открытым способом, в отличие от Донбасса, где открытый способ не является экономически обоснованным. Открытая геотехнология реализует только нисходящий порядок отработки запасов, в то время как подземный

позволяет отрабатывать запасы как в нисходящем, так и в восходящем порядке.

Одним из главных экономических показателей эффективности работы предприятия является себестоимость продукции — удельная стоимость или затраты, отнесённые на единицу выпускаемой продукции. Рассматривая вопрос конкурентоспособности и экономической эффективности угледобычи в Восточном Донбассе, следует остановиться на некоторых моментах: во-первых, объективные рыночные и формажорные факторы, такие как военные действия, экономическая блокада и скачки спроса на высокометаморфизованные антрациты, обнажили многие проблемы угольной отрасли, накапливавшиеся годами, а именно — доставшиеся от советской эпохи модели финансирования, менеджмента и развития предприятий и отрасли в целом являются слишком инертными в условиях рыночной экономики и слабо адаптируются под изменяющиеся условия; во-вторых, для Донбасса уголь — превалирующий невозобновляемый ресурс, что требует особого подхода к его разработке и применению; в-третьих, в современных условиях развития альтернативных источников энергии применение угля только в качестве топлива экономически не оправдано. Кроме того, практически все шахты Донбасса работают в нисходящем порядке отработки запасов, что обуславливает тенденцию роста удельных условно-постоянных затрат на добычу 1 т [2], что описывается кривой $C(t)$ на рисунке 1.

Область экономически эффективного производства для зависимостей, представленных на рисунке 1, описывается выражением

$$E = \int_{x_1}^{x_2} (f_1(x) - f_2(x)) dx, \quad (1)$$

где E — область экономически эффективного производства; x_1 и x_2 — соответственно время освоения производственной мощности t_1 и время при достижении вто-

рой точки безубыточности производства t_2 при соответствующей производственной мощности шахты A_1 и A_2 ; $f_1(x)$ — функция, аппроксимирующая условно-переменные затраты $C(t)$; $f_2(x)$ — функция, аппроксимирующая удельные условно-постоянные затраты $C(A)$.

Минимальная себестоимость добычи C_{\min} будет достигнута в момент времени t_2 при соответствующей оптимальной производственной мощности A_2 , превышение которой приведёт к последующему достижению второй точки безубыточности производства 2.

Область экономически эффективного производства при восходящем порядке отработки запасов одной и той же шахты более чем на 20 % превышает данный параметр при отработке от верхней к нижней технической границе шахтного поля. Данный факт являлся не последним аргументом в пользу соответствующей технологии, реализуемой на многих предприятиях за рубежом [2, 3].

Однако при сравнении различных способов развития шахтного фонда вариант обратного порядка отработки запасов имеет меньший инновационный потенциал, а при определённых условиях модернизация технологического процесса и фондов предприятия может привести к быстрейшему достижению второй точки безубыточности производства.

В связи с этим принятие решения об отработке запасов в восходящем порядке должно основываться на чётком представлении о сроках отработки запасов, их количестве и качестве, а также о структурной нише предприятия в бюджетообразующем потенциале города или района.

При вовлечении в эксплуатацию запасов с отличными от прогнозных качественными показателями, например вынимаемой мощностью, а также при повышении производственной мощности шахты себестоимость нового варианта технологии для прямого порядка отработки запасов определяется по формуле [4, 5]:

$$C_{Ni} = \left[\frac{A_{\delta} + \Delta A \cdot \sum (m_{\delta} \cdot \gamma_{\delta}) / \sum (m_{\delta} \cdot \gamma_{\delta})}{A} \right] \cdot \left[1 - \varphi \cdot \left(1 - \frac{A_{\delta}}{A} \right) \right] \cdot C_{\delta\delta}, \quad (2)$$

где $C_{\delta\delta}$ — себестоимость добытого угля при базовом варианте, у. е./т; A_{δ} — производственная мощность при базовом варианте, т/год; A — производственная

мощность нового варианта, т/год; ΔA — увеличение производственной мощности при новом варианте геотехнологии, т/год; m_{δ} и m_{δ} — мощность пластов соответственно при базовом и новом варианте геотехнологии, м; γ_{δ} и γ_{δ} — удельный вес пластов соответственно при базовом и новом варианте геотехнологии, кН/м³; φ — доля условно-постоянных затрат в себестоимости добычи, доли ед.

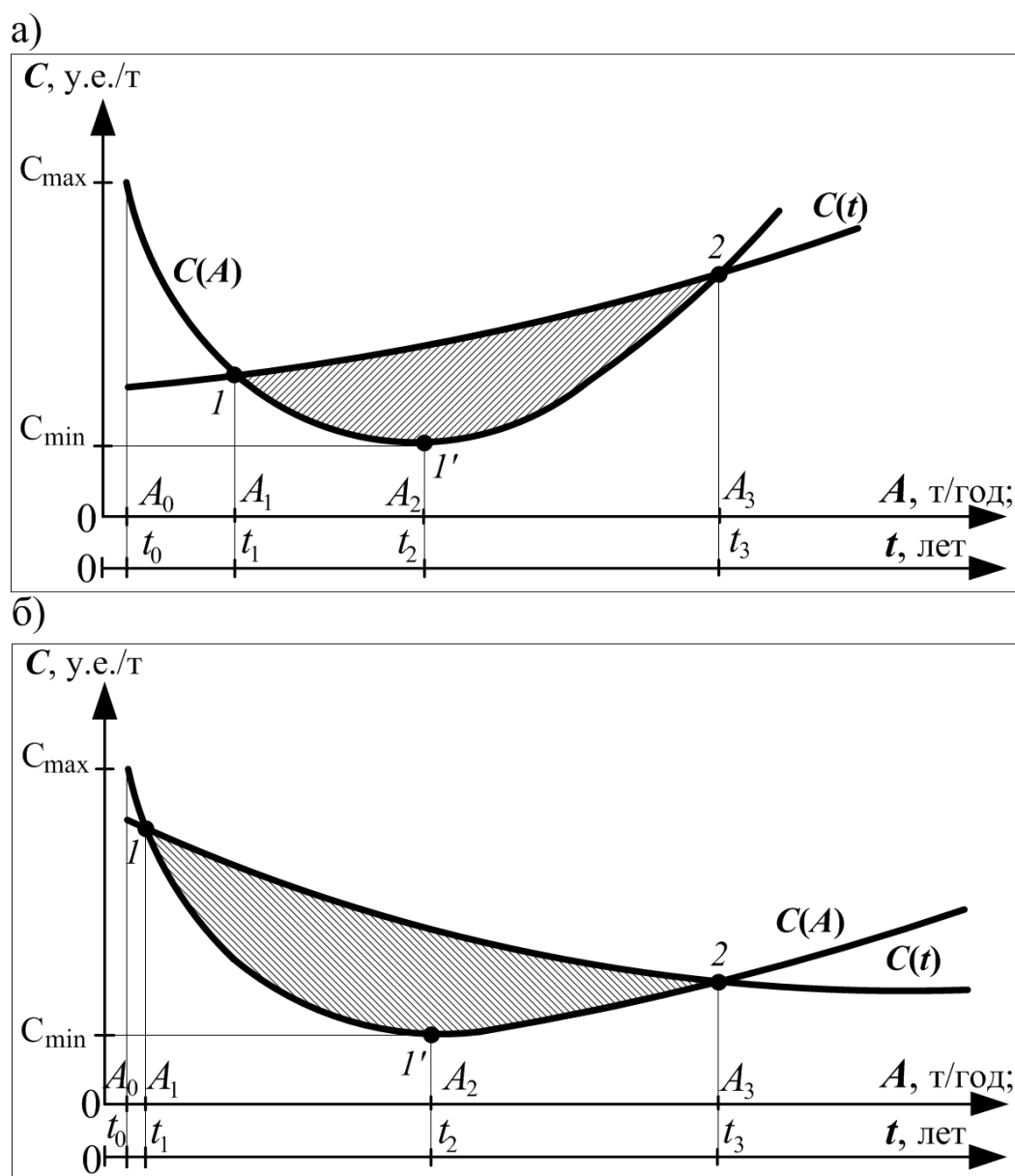


Рисунок 1 Тенденция изменения удельных затрат добычи угля при нисходящем (а) и восходящем (б) порядке отработки запасов

Одним из направлений повышения эффективности использования ресурсов угольных месторождений является производство на основе угля продуктов высокого спроса, стоимость которых в 20–25 раз выше стоимости самого угля. Например, из 1 тонны антрацита, стоимость которого около 3–4 тыс. руб., можно получить 1 тонну углеродного сорбента, стоимость которого может достигать 3 млн руб. [5].

Поскольку к ресурсам месторождения относится не только уголь, следует оценить потенциал использования недр в других направлениях, таких как попутная добыча газа, производство строительных материалов, добыча редкоземельных элементов,

использование подземных вод, использование добытых пород как стройматериалов, медицина, использование подземных пустот, фармакология, использование угля в качестве фильтрующего агента и др.

На рисунке 2 представлены варианты эффективного использования недр, реализация которых позволит существенно повысить область экономической эффективности и конкурентоспособности, поскольку любой вариант геотехнологии предоставляет возможность получать высокую прибыль при практически постоянных затратах, тем самым увеличивая область экономически эффективного производства.



Рисунок 2 Основные направления комплексного освоения недр

Выводы и направление дальнейших исследований. Вышеизложенное позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Себестоимость угля при нисходящем порядке отработки запасов при отсутствии инновационных путей развития будет возрастать в связи с увеличением постоянных и удельных переменных затрат.

2. Потенциал использования угля позволяет выводить его на новые рынки, что

может привести к формированию экономической деятельности, в которой ископаемый уголь будет являться началом цепочки по созданию продукции с высокой добавленной стоимостью.

К направлению дальнейших исследований относится определение параметров экономически эффективной и конкурентоспособной комплексной геотехнологии в условиях антрацитовых шахт Донбасса.

Библиографический список

1. Развитие угольной промышленности в России [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://doloni.ru/ugolnaya_promyshlennost_rossii.html#h2_3.
2. Палейчук, Н. Н. Оценка технико-экономического уровня угольных шахт [Текст] / Н. Н. Палейчук, Ю. И. Кобзарь, А. П. Должикова // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — 2013. — Вып. 40. — С. 51–57.
3. Каплунов, Д. Р. Развитие теории проектирования комплексного освоения недр при разработке рудных месторождений [Текст] / Д. Р. Каплунов // Горный журнал. — 2005. — № 5. — С. 12–15.
4. Белодедов, А. А. Обоснование технологии разработки тонких и средней мощности пологих и наклонных угольных пластов с учётом качества добываемой горной массы (на примере шахт Восточного Донбасса) [Текст] / А. А. Белодедов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 7. — С. 144–158.
5. Разоренов, Ю. И. Методика повышения эффективности работы антрацитовых шахт [Текст] / Ю. И. Разоренов и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № 9. — С. 51–55.

© Палейчук Н. Н.

© Князьков О. В.

© Спичак Ю. Н.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ГД ЛНУ им. Даля Рябичевым В. Д.,
к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Леоновым А. А.*

Статья поступила в редакцию 30.05.18.

к.т.н. Палейчук М. М., к.т.н. Князьков О. В. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР),
д.т.н. Спичак Ю. М. (АФГТ ЛНУ им. В. Даля, м. Антрацит, ЛНР)

ПРО ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ГЕОТЕХНОЛОГІЇ

Розглянуто аспекти потенційного перспективного стратегічного техніко-економічного розвитку вугледобувної галузі. Наведено основні типи економічних моделей вугледобувних підприємств при низхідному і висхідному порядках відпрацювання запасів шахтних полів. Виконано аналіз напрямків підвищення ефективності функціонування підприємств вугільної галузі.

Ключові слова: вугільні запаси, споживання, видобуток, конкурентоспроможність, собівартість, економічна ефективність, комплексне освоєння надр.

PhD Paleyichuk M. M., PhD Knyaz'kov O. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR),

Doctor of Tech. Sc. Spichak Yu. N. (Anthracite Department of Mining and Transportation of Lugansk National University after V. Dahl, Anthracite, LPR)

ABOUT TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF GEOTECHNOLOGY

There have been studied the aspects for potential strategic technical and economic development of coal mining industry. There have been given the main types of economic models of coal mining enterprises at the descending and ascending orders for removing the mine field reserve. Analysis has been made for the directions to increase the function efficiency of mining enterprises.

Key words: coal reserves, consumption, mining, competitiveness, cost price, economic efficiency, integrated resource development.

УДК 622.261

к.т.н., д.э.н. Бизянов Е. Е.,
к.т.н. Смекалин Е. С.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ОБЗОР И ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕОРИИ НЕЧЁТКИХ МНОЖЕСТВ В ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЁТАХ

Предложен подход для определения геотехнологических параметров в горнодобывающем производстве, который позволяет на основании использования теории и методологии нечётких множеств обосновать выбор решений в условиях неопределённости исходных данных и изменчивости организационно-технологической структуры реализуемых работ. Приведены примеры использования прямых вычислений с использованием нечётких интервалов и производственных моделей с лингвистическими переменными для определения надёжности горнопроходческой техники и стоимости сооружения горных выработок с учётом влияния изменения скорости проходки и трудоёмкости работ.

Ключевые слова: теория нечётких множеств, нечёткое число, нечёткий интервал, лингвистическая переменная, производственная модель, когнитивная карта, нечёткая искусственная нейронная сеть, геотехнологические расчёты, надёжность, стоимость выработки.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами.

Особенностями горнодобывающего производства являются динамическое изменение технологического пространства, сложная взаимосвязь подготовительных, очистных, вспомогательных работ и процессов, происходящих в массиве горных пород, случайные опасные события, такие как внезапные выбросы, горные удары, обрушение выработок и т. п. [1], что весьма затрудняет корректное аналитическое описание данной системы.

Сложность выполнения расчётов обусловлена случайным характером исходных данных (параметров месторождений, горного давления, газодинамических процессов в массиве и т. д.) [2], отсутствием возможности на этапе проектирования детально изучить весь массив пород, в котором будут сооружаться горные выработки, точно предсказать его поведение в процессе реализации проекта [3]. При этом часто в практической работе специалисты полагаются в первую очередь на опыт и интуицию, что приводит к субъективным результатам, далёким от оптимальных [3].

Джеф Кайерс выделяет следующие источники неопределённости в науках о Земле [4]:

- ошибки измерений;
- связанные с тем, что уже обработанные данные могут быть интерпретированы многими способами, причём для интерпретации нужно создавать отдельные модели;
- вызванные различными физическими явлениями, которые сами по себе являются неопределёнными и оцениваются с помощью моделей;
- косвенность информации, полученной в результате геофизических или дистанционных измерений.

Модели, которые используются в настоящее время для описания различных технических объектов и процессов, в основном базируются на использовании количественной информации. При построении таких моделей требуется детализированное описание причинно-следственных связей и процессов (детерминированные модели) либо наличие значительного массива статистических данных о результатах функционирования исследуемого объекта.

При решении геотехнологических задач часть исходных данных может быть представлена в точной числовой форме: «длина горной выработки составляет 1000 метров»; часть — в виде интервала: «прочность

алевролита на одноосное сжатие *в пределах* от 33 МПа до 39 МПа» [6]; или в лингвистической форме: «Среди выработок часто встречаются камеры, которые, в отличие от *протяжённых* выработок (длина *значительно* превышает поперечные размеры), имеют при *сравнительно больших* поперечных размерах *небольшую* длину» [2]. Выделенные курсивом слова характеризуют имеющуюся неопределённость.

Существующие на данный момент методики расчёта геотехнологических параметров оперируют преимущественно с точно заданными исходными данными. Для использования данных, представленных в виде интервала, а также в лингвистической форме, удобно использовать математический аппарат нечётких множеств, а также нечёткую математику, которые на сегодняшний день широко используются в технике, экономике, биологии и других областях науки [5, 7]. Особенностью нечётких моделей является возможность моделирования сложных объектов, для которых не существует детализированного описания, отсутствуют достоверные статистические данные либо их недостаточно.

Постановка задачи. Задачей данной работы является рассмотрение возможностей использования теории нечётких множеств и нечёткой математики в приложении к геотехнологическим расчётам.

Изложение материала и его результаты. Сначала рассмотрим отличия теории вероятности и математической статистики, широко использующихся в современной науке о Земле, от теории нечётких множеств, которую ещё называют теорией возможности.

С помощью понятия «вероятность» обычно описывают события, которые могут произойти в будущем, а могут и не произойти. Возможность же оценивает событие, которое обязательно произойдёт, но с определённым уровнем «успеха».

Далее рассмотрим минимально необходимые теоретические сведения из теории нечётких множеств (НМ) и нечёткой математики.

Нечётким множеством (НМ) A в некотором (непустом) пространстве X , $A \subseteq X$ называется множество пар (кортежей) вида [5]

$$A = \{(x, \mu_A(x); \forall x \in X)\}, \quad (1)$$

где x — элементы множества X , которое также называют универсумом; $\mu_A(x)$ — функция принадлежности нечеткого множества A .

Функция принадлежности (ФП) нечёткого множества ставит в соответствие каждому значению x число — *степень принадлежности* из интервала $[0;1]$, то есть представляет собой отображение вида [5]

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0;1], \forall x \in X. \quad (2)$$

Если степень принадлежности $\mu_A(x)=1$, говорят о полной принадлежности x к НМ A , т. е. $x \in A$. Значение $\mu_A(x)=0$ означает отсутствие принадлежности x к НМ A , т. е. $x \notin A$ [5].

Конечные НМ часто представляют в виде [5, 7]

$$A = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i}, \quad (3)$$

где n — количество элементов нечёткого множества A .

Знак «+» в (3) не означает сумму в математическом смысле, его следует понимать как множественное суммирование элементов. Знак «—» также не означает деления, он отражает присваивание конкретным элементам x_1, x_2, \dots, x_n степеней принадлежности $\mu_A(x_1), \mu_A(x_2), \dots, \mu_A(x_n)$.

Интерпретации функции принадлежности могут быть различными в зависимости от конкретной задачи. Можно выделить три характерных случая использования нечётких величин для представления [7]:

- исходных данных, значения которых неточно известны из-за воздействия частично неуправляемых факторов;

- данных, значения которых управляемы и зависят от предпочтений, но на момент моделирования не определены;

– лингвистических оценок.

В первом случае говорят об интерпретации функции принадлежности в терминах возможности, во втором и третьем — в терминах предпочтений.

На рисунках 1–3 приведены примеры типовых ФП. Их можно трактовать следующим образом:

– рисунок 1: а — «более чем V_1 », б — «приблизительно равно V_4 », в — «не более чем V_7 »;

– рисунок 2: а — «от V_1 до приблизительно V_2 », б — «между V_5 и V_6 », в — «от приблизительно V_9 до V_{10} »;

– рисунок 3 — «приблизительно равно V_1 ».

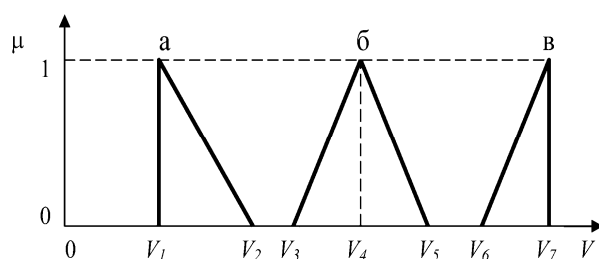


Рисунок 1 Треугольные функции принадлежности

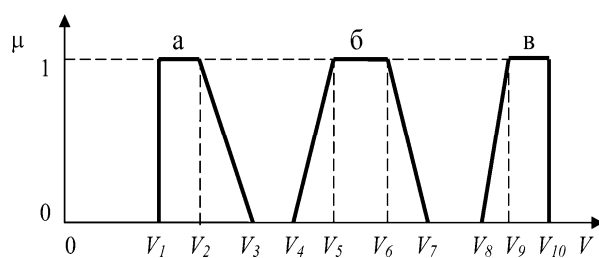


Рисунок 2 Трапециевидные функции принадлежности

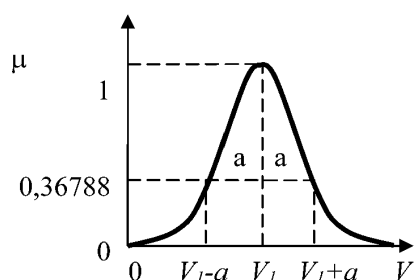


Рисунок 3 Функция принадлежности гауссовского типа

В нечётких моделях входные и выходные переменные представляют в виде нечётких множеств, которые могут быть выражены нечёткими числами и нечёткими интервалами.

Нечёткое число — это нечёткая величина, ФП которой является выпуклой и уни-модальной. В качестве функции принадлежности нечёткого числа могут выступать функции, приведённые на рисунках 1 и 3. *Нечёткий интервал* — нечёткая величина с выпуклой ФП, например, одной из приведённых на рисунке 2. Для упрощения работы с нечёткими числами и нечёткими интервалами их функции принадлежности принимают нормальными ($\mu_{max}=1$).

Использование L-R-представления (Left-Right — левая и правая часть нечёткого числа) [5] позволяет упростить базовые операции для нечётких чисел и нечётких интервалов. Так, если функции принадлежности двух нечётких чисел A и B имеют вид, показанный на рисунке 1,б, то параметры функции принадлежности их суммы следующие [5]:

$$m_{A+B} = m_A + m_B,$$

$$m_{A+B} - \alpha_{A+B} = (m_A - \alpha_A) + (m_B - \alpha_B), \quad (4)$$

$$m_{A+B} + \beta_{A+B} = (m_A + \beta_A) + (m_B + \beta_B),$$

где m_A, m_B — моды нечётких чисел A и B (V_4 на рис. 1,б) соответственно;

α_A, α_B — левая часть нечётких чисел A и B (V_4-V_3 на рис. 1,б) соответственно;

β_A, β_B — правая часть нечётких чисел A и B (V_5-V_4 на рис. 1,б) соответственно.

Разность A и B с использованием L-R-представления [5]:

$$m_{A-B} = m_A - m_B,$$

$$m_{A-B} - \alpha_{A-B} = (m_A - \alpha_A) - (m_B - \alpha_B), \quad (5)$$

$$m_{A-B} + \beta_{A-B} = (m_A + \beta_A) - (m_B + \beta_B).$$

Произведение A и B с использованием L-R-представления [5]:

$$m_{A \times B} = m_A \times m_B,$$

$$m_{A \times B} - \alpha_{A \times B} = (m_A - \alpha_A) \times (m_B - \alpha_B), \quad (6)$$

$$m_{A \times B} + \beta_{A \times B} = (m_A + \beta_A) \times (m_B + \beta_B).$$

Частное A и B с использованием L-R-представления [5]:

$$\begin{aligned} m_{A \div B} &= m_A \div m_B, \\ m_{A \div B} - \alpha_{A \div B} &= (m_A - \alpha_A) \div (m_B - \alpha_B), \quad (7) \\ m_{A \div B} + \beta_{A \div B} &= (m_A + \beta_A) \div (m_B + \beta_B). \end{aligned}$$

Важной особенностью теории нечётких множеств является возможность моделирования лингвистических переменных, что часто необходимо при интерпретации экспертных оценок. Лингвистическая переменная отличается от числовой переменной тем, что в качестве её значений используются слова, выражения или предложения, что позволяет приближённо описать явления, которые или сложны, или не могут быть выражены в точной количественной форме, или их значение неизвестно [7].

Лингвистическая переменная является переменной более высокого порядка, чем нечёткая переменная, так как её значения интерпретируются нечёткими множествами. Её формально определяют как кортеж вида [5, 7]: $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$, где β — имя лингвистической переменной; T — базовое терм-множество (множество её значений — термов, каждый из которых является нечёткой переменной α); X — область определения нечётких переменных, определяющих термы; G — синтаксическая процедура, определяющая механизм образования новых значений из множества T ; M — семантическая процедура, позволяющая получить для каждого нового значения, полученного с помощью процедуры G , новое нечёткое множество, имеющее осмысленное содержание.

Содержимое терм-множества обычно ограничено несколькими значениями, определяющими приблизительное описание исследуемого параметра в определённой предметной области.

Рассмотрим лингвистическую переменную, определяющую запас полезного ископаемого в месторождении ($З_{\text{пи}}$), целесообразный для начала его промышленной разработки. Для данной переменной:

β = «Запас полезного ископаемого»;

$T = \{\text{низкий, достаточный, высокий}\}$;

$X = [0, 100]$ — обеспеченность в %;

G содержит связки «И», «ИЛИ» и модификаторы типа «очень», «НЕ», «слегка» и т. п., позволяющие получать новые термы;

M — процедура задания на области определения X нечётких переменных $\alpha_1 = \text{«низкий»}$, $\alpha_2 = \text{«достаточный»}$ и $\alpha_3 = \text{«высокий»}$, а также нечётких множеств для термов $G(T)$ с использованием модификаторов и связок.

На рисунке 4 показан пример функций принадлежности для лингвистической переменной, состоящей из нечётких переменных $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$.

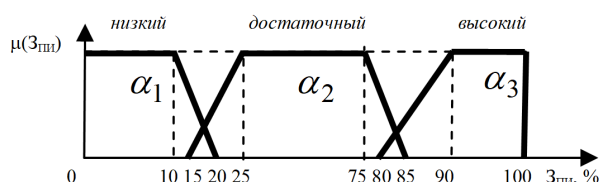


Рисунок 4 Лингвистическая переменная β

Рассмотрим методы и модели, использующие нечёткую математику и нечёткую логику, которые целесообразно использовать для решения задач.

Прямые вычисления. Использование прямых вычислений предполагает наличие расчётных формул для исследуемых показателей. Исходные данные обычно представляют в виде треугольных нечётких чисел или нечётких интервалов [7].

Рассмотрим, как реализуется данный подход на примере расчёта коэффициента готовности проходческого комбайна [6]:

$$K_{\Gamma} = \frac{\text{Наработка на отказ}}{\text{Наработка на отказ} + \text{Восстановление}}. \quad (8)$$

Пусть *Наработка на отказ* (НО) и *Наработка на отказ + Восстановление* (ОВ) — нечёткие интервалы (рис. 5).

Параметры функций принадлежности примем следующие (в минутах): $a=580$, $b=620$, $c=850$, $d=950$, $e=500$, $f=530$, $g=650$, $h=700$. Результат вычисления коэффици-

ента готовности проходческого комбайна с использованием формулы (8) показан на рисунке 6.

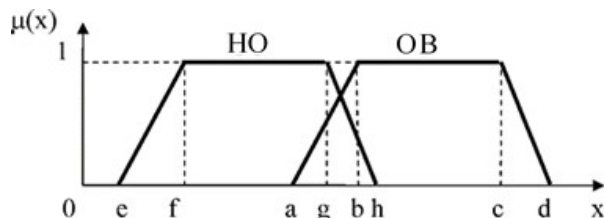


Рисунок 5 Функции принадлежности исходных показателей

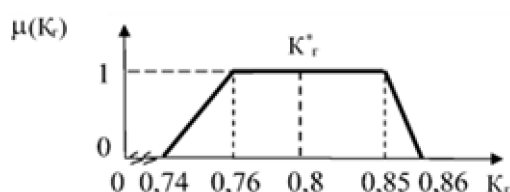


Рисунок 6 Результат расчёта коэффициента готовности

Полученный нечёткий интервал уже даёт представление о возможном диапазоне значений коэффициента готовности. Дефазификация (приведение нечёткого значения к чёткому) с использованием метода центра тяжести [5] даёт числовое значение K_r^* :

$$K_r^* = \frac{\sum_i K_{ri} \cdot \mu(K_{ri})}{\sum_i \mu(K_{ri})} = 0,80. \quad (9)$$

Достоинство метода прямых вычислений состоит в его простоте и наглядности. Недостатком является необходимость наличия расчётной формулы, т. е. явной связи между показателями, входящими в формулу.

Нечёткие продукционные модели основаны на нечётких правилах вида «ЕСЛИ A , ТО B », где A — предпосылка, B — заключение. Исходные данные сначала подвергаются фазификации (приведению к нечёткости), затем преобразуются с использованием продукционных правил, а результат [5, 7].

Пример. Пусть имеется три лингвистических переменных, определяющих следующие показатели: $X1$ — скорость проходки

горной выработки, м/мес. (СП), $X2$ — производительность труда проходчиков (ПТ) и Y — сметная стоимость готовой выработки (ССВ). Сметная стоимость выработки, в свою очередь, состоит из оплаты труда, которая зависит от его производительности, затрат на материалы и обслуживание забойных машин в сумме с накладными и общешахтными расходами. Прямой связи между показателями $X1$, $X2$ и Y нет. Логическая связь следующая: изменение скорости проходки СП приводит к изменению производительности труда ПТ, что вызывает изменение оплаты труда и, в конце концов, изменение сметной стоимости ССВ. Необходимо оценить ССВ как функцию от ПТ и СП:

$$Y = f(X1, X2). \quad (10)$$

Пусть все переменные определены на терм-множестве

$$T(X) = T(X1) = T(X2) = T(Y) = \{ \text{низкий (H); средний (C); высокий (B)} \},$$

функции принадлежности термов которого приведены на рисунке 7.

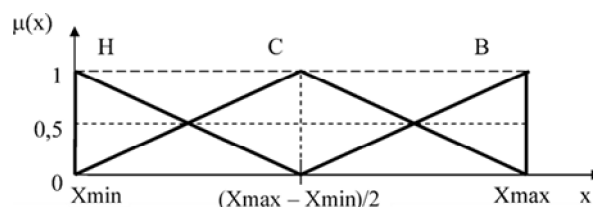


Рисунок 7 Функции принадлежности терм-множества $T(X)$

Возьмем для примера два произвольных значения переменных x_1 и x_2 , одно из которых находится между минимальным и средним значением, а второе — между средним и максимально возможным значением:

$$x_1 = 0,3X_{\max-\min} \text{ и } x_2 = 0,8X_{\max}, \quad (11)$$

где x — это x_1 или x_2 , X_{\max} , X_{\min} — их максимальные и минимальные значения.

Определим, в каком случае сметная стоимость выработки будет минимальна. Для продуцирования значения $Y(ССВ)$ используем правило вывода Мадмани [5], которое для рассматриваемого случая запишем в виде:

П1: Если СП = Н и ПТ = Н, То ССВ = Н;
 П2: Если СП = Н и ПТ = С, То ССВ = Н;
 П3: Если СП = Н и ПТ = В, То ССВ = С;
 П4: Если СП = С и ПТ = Н, То ССВ = Н;
 П5: Если СП = С и ПТ = С, То ССВ = С; (12)
 П6: Если СП = С и ПТ = В, То ССВ = В;
 П7: Если СП = В и ПТ = Н, То ССВ = С;
 П8: Если СП = В и ПТ = С, То ССВ = В;
 П9: Если СП = В и ПТ = В, То ССВ = В.

Соответствующие x_1 , x_2 степени принадлежности следующие (см. рис. 7):

$$\begin{aligned}\mu_H(x_1) &= 0,4; & \mu_C(x_1) &= 0,6; \\ \mu_B(x_1) &= 0; & \mu_H(x_2) &= 0; \\ \mu_C(x_2) &= 0,45; & \mu_B(x_2) &= 0,55.\end{aligned}$$

После выполнения операции произведения получаем:

$$\begin{aligned}\mu_H(x_1) \cdot \mu_C(x_2) &= 0,4 \cdot 0,45 = 0,18; \\ \mu_H(x_1) \cdot \mu_H(x_2) &= 0,4 \cdot 0,0 = 0; \\ \mu_H(x_1) \cdot \mu_B(x_2) &= 0,4 \cdot 0,55 = 0,22; \\ \mu_C(x_1) \cdot \mu_H(x_2) &= 0,6 \cdot 0 = 0; \\ \mu_C(x_1) \cdot \mu_C(x_2) &= 0,6 \cdot 0,45 = 0,27; \\ \mu_C(x_1) \cdot \mu_B(x_2) &= 0,6 \cdot 0,55 = 0,33; \\ \mu_B(x_1) \cdot \mu_H(x_2) &= 0 \cdot 0 = 0; \\ \mu_B(x_1) \cdot \mu_C(x_2) &= 0 \cdot 0,45 = 0; \\ \mu_B(x_1) \cdot \mu_B(x_2) &= 0 \cdot 0,55 = 0.\end{aligned}$$

Использование наиболее распространенного в нечёткой логике оператора объединения, который учитывает степень оптимизма в оценке результата — непараметризованной s -нормы максимума [5], даёт

$$\text{MAX}(\mu(x_1) \cdot \mu(x_2)) = \mu_C(x_1) \cdot \mu_B(x_2) = 0,33.$$

Этому результату соответствует правило П6 (12) — т. е. эффективное значение ССВ можно получить при среднем значении СП и высоком значении ПТ. Для оценки величины ССВ применим оператор импликации Мадмани и получим нечёткое число, показанное на рисунке 8.

Дефаззификация с использованием центра тяжести даёт

$$Y = f(X_1, X_2) = 0,83 \cdot Y_{\max}, \quad (13)$$

где Y_{\max} — расчётная максимальная сметная стоимость строительства выработки.

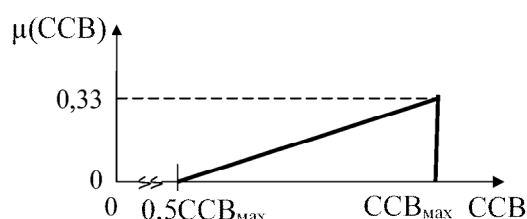


Рисунок 8 Результат нечёткого вывода

К достоинствам продукционных моделей относятся совместное использование числовых и лингвистических данных, а также возможность получения оценки в случае математически несвязанных исходных данных. Недостатком можно считать многообразие способов нечёткого вывода и дефаззификации, что требует наличия определённого опыта и специальных знаний у разработчика моделей.

Нечёткие регрессионные модели базируются на линейных либо нелинейных уравнениях [7] и используются для получения прогнозных значений показателей в диапазоне возможных значений факторов. Уравнение линейной множественной регрессии в матричной форме:

$$\vec{Y} = \mathbf{A} \cdot \vec{X} + \vec{L}, \quad (14)$$

где \vec{Y} — вектор зависимых переменных; \vec{X} — вектор независимых переменных модели; \mathbf{A} — матрица коэффициентов уравнений; \vec{L} — вектор ошибок.

Представление коэффициентов a_{ij} матрицы \mathbf{A} треугольными симметричными нечёткими числами вида

$$a_{ij} = (a_{ij}^C - b_{ij}, a_{ij}^C, a_{ij}^C + b_{ij}), \quad (15)$$

где a_{ij}^C — центр (мода) нечёткого числа; b_{ij} — половина носителя нечёткого числа, позволяет представить зависимость $Y(X)$ в виде «коридора» возможных значений, как показано на рисунке 9.

Для получения оценок модели используют метод наименьших квадратов, интервальную оценку, нечёткую кластеризацию [7].

В отличие от регрессии с чёткими коэффициентами нечёткая регрессия позволяет получить диапазон возможных значений, обеспечивая охват области исходных данных, что является достоинством метода.

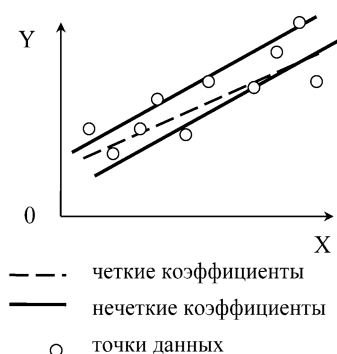


Рисунок 9 Гипотетические регрессионные функции при чётких и нечётких коэффициентах регрессии

Нечёткие когнитивные карты (модели) отражают представление специалистов, работающих с определённой проблемой, в виде схемы взаимодействия объектов предметной области и позволяют смоделировать предметную область в виде пространственной схемы. На настоящий момент выделяют такие разновидности когнитивных карт: однослойные и многослойные, детерминированные и стохастические, нечёткие, динамические и статические, управляемые и неуправляемые. Это далеко не полный перечень разновидностей когнитивных карт, и он постоянно пополняется [7].

Различают нечёткие когнитивные карты Коско и Силова, отличающиеся правилами формирования выходного результата. Карты Коско основаны на введении нечёткости связей между концептами, в картах Силова нечёткими являются как связи, так и концепты.

При создании когнитивных моделей используются как научные знания, так и личное представление (опыт) разработчиков. Когнитивную модель изображают в виде знакового ориентированного графа (см. рис. 10) или представляют матрицей, в ячейки которой заносят знаки или коэффициенты, отображающие отношения между объектами модели (концептами).

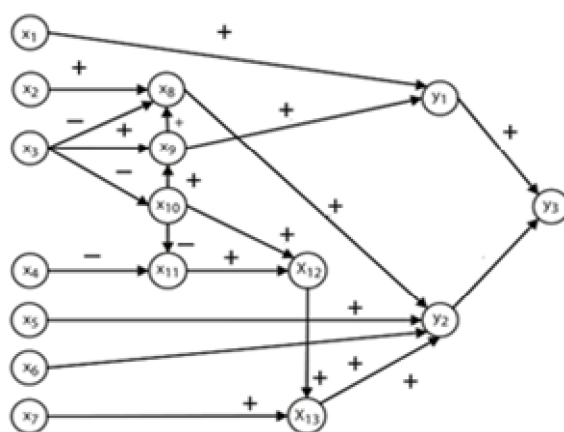


Рисунок 10 Пример когнитивной модели

Узлы графа (концепты) — это нечёткие переменные, ФП которых могут быть треугольными или трапецеидальными. Знаки «+» и «-» показывают влияние концептов друг на друга: например, при увеличении x_1 увеличивается y_1 . Оценка значений концептов производится или путём расчёта, или с использованием продукционных правил.

Достоинствами нечётких когнитивных карт являются простота их разработки и применения, возможность одновременного использования количественных и качественных данных. Основной недостаток — низкая точность получаемых с их помощью результатов.

Нечёткие искусственные нейронные сети (НИНС) позволяют объединить возможности нечётких моделей и искусственных нейронных сетей. Известны следующие структуры НИНС: продукционные, с нечёткой структурой и сети на базе нечётких нейронов [7].

Нечёткие искусственные нейронные сети позволяют получить средневзвешенное значение выходной переменной, при этом обеспечивая дополнительные нелинейные возможности в виде данных для регрессионного анализа.

К достоинствам нечётких нейронных сетей следует отнести: прозрачность структуры, однозначную зависимость выхода от входа, простоту алгоритма обучения. Недостатком можно считать меньшую гибкость по сравнению со стандартными структурами искусственных нейронных сетей.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Ценность рассмотренных методов описания геотехнологических процессов состоит в том, что в условиях неопределённой ситуации производства горных работ можно дать адекватную количественную и качественную оценку изменчивых параметров, существенно сократив затраты труда и времени на определение вероятностных показателей методами математической статистики, а также упростив композиционирование полученных законов распределения для получения значений целевых функций.

На основании проведённого обзора моделей, полученных на основании теории нечётких множеств, можно рекомендовать использовать расчётные, производственные модели и нечёткие искусственные нейронные сети на

этапе анализа исходной геотехнической информации; нечёткие регрессионные модели, нечёткие временные ряды и нечёткие когнитивные карты — как при анализе, так и при разработке проектов и прогнозировании деятельности горнодобывающих предприятий.

Использование данных методов позволит обосновать реальную структуру горных работ и рассчитать значения геотехнологических параметров, которые будут соответствовать фактическим условиям. Разработанные на основе методов нечётких множеств программные продукты позволяют оперативно реагировать на происходящие изменения организации и технологии работ, либо предвидеть возможные возмущения в пространстве и во времени за весь период реализации проекта в заданных пределах возможностей.

Библиографический список

1. Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли [Текст] / Под ред. К. Н. Трубецкого. — М. : Изд-во Академии горных наук, 1997. — 478 с.
2. Литвинский, Г. Г. Расчёт крепи горных выработок на ЭВМ [Текст] : учеб. пособ. / Г. Г. Литвинский, Э. В. Фесенко, Е. В. Емец. — Алчевск : ДонГТУ, 2011. — 174 с.
3. Быков, А. В. Использование нечётких множеств в геологии [Текст] / А. В. Быков, В. Э. Борzych // Вестник Тюменского государственного университета. — Тюмень, 2009. — № 6. — С. 185–191.
4. Caers, Jef. Modeling Uncertainty in the Earth Sciences [Text] / J. Caers. — Oxford : John Wiley & Sons Ltd., 2011. — 229 p.
5. Пегат, А. Нечёткое моделирование и управление [Текст] : пер. с англ. / А. Пегат. — М. : БИНОМ ; Лаборатория знаний, 2011. — 798 с. : ил.
6. Торбин, В. У. Надёжность и эффективность в технике [Текст] : справочник. В 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем / В. У. Торбин и др.; под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. — М. : Машиностроение, 1988. — 328 с.
7. Бизянов, Е. Е. Нечёткие модели и нейронные сети в анализе и управлении экономическими объектами [Текст] : монография / [Е. Е. Бизянов, Ю. Г. Лысенко, А. Г. Хмелев и др.] ; под. ред. чл.-корр. НАН Украины, д.э.н., проф. Ю. Г. Лысенко. — Донецк : Юго-Восток, 2012. — 388 с.

© Бизянов Е. Е.

© Смекалин Е. С.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТУ Литвинским Г. Г.,
д.т.н., проф. каф. РМПИ ДонНТУ Новиковым А. О.

Статья поступила в редакцию 30.05.18.

к.т.н., д.е.н. Бізянов Є. Є., к.т.н. Смекалін Є. С. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ОГЛЯД І МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН В ГЕОТЕХНОЛОГІЧНИХ РОЗРАХУНКАХ

Запропоновано підхід для визначення геотехнологічних параметрів в гірничо-видобувному виробництві, який дозволяє на підставі використання теорії та методології нечітких множин обґрунтувати вибір рішень в умовах невизначеності вхідних даних і мінливості організаційно-технологічної структури гірничих робіт. Наведено приклади використання прямих обчислень з використанням нечітких інтервалів і продукційних моделей з лінгвістичними змінними для визначення надійності гірничо-прохідницької техніки і вартості спорудження гірничих виробок з урахуванням впливу зміни швидкості проходки і трудомісткості робіт.

Ключові слова: теорія нечітких множин, нечітке число, нечіткий інтервал, лінгвістична змінна, продукційна модель, когнітивна карта, нечітка штучна нейронна мережа, геотехнологічні розрахунки, надійність, вартість виробки.

Ph.D., Doctor of Economics Bizianov E. E., Ph.D. Smekalin E.S. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

REVIEW AND POSSIBILITY OF USING THE THEORY OF FUZZY SETS IN GEOTECHNOLOGICAL CALCULATIONS

An approach is proposed for determining geotechnological parameters in mining production, which based on the theory and methodology of fuzzy sets enables justifying the choice of solutions under conditions of uncertainty in the initial data and the variability of the organizational and technological structure of the works implemented. Examples are given of using direct calculations with fuzzy intervals and production models with linguistic variables for determining the reliability of mining equipment and the cost of mine workings constructing, considering the effect of changes in the heading rate and labor input.

Key words: fuzzy sets theory, fuzzy number, fuzzy interval, linguistic variable, product model, cognitive map, fuzzy artificial neural network, geotechnological calculations, reliability, production cost.

УДК 622.261.2: 622.831.322

д.т.н. Калякин С. А.,
д.т.н. Лабинский К. Н.,
Азаматов Р. И.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ В ЗАБОЯХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ СОТРЯСАТЕЛЬНОМ ВЗРЫВАНИИ

Изучен процесс локализации внезапного выброса угля и газа насыпными породными перемычками в забоях проводимых подготовительных горных выработок на выбросоопасных угольных пластах при сотрясательном взрывании. Определены параметры внезапного выброса и необходимые для защиты горной выработки от действия газо-угольного потока параметры защитной перемычки. Установлена необходимая толщина породной перемычки для защиты горной выработки и локализации внезапного выброса при сотрясательном взрывании в подготовительных забоях горных выработок, проводимых по смешанным выбросоопасным забоям.

Ключевые слова: аналитические исследования, газовый клатрат, газо-угольный поток, защитная породная перемычка.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Наиболее распространённым способом разрушения пород при проведении горных выработок остаётся буровзрывной, а по выбросоопасным пластам этот способ реализуется в специальном режиме сотрясательного взрывания. Этот вид взрывных работ позволяет проводить подготовительные горные выработки сравнительно безопасно и обеспечивать воспроизведение и подготовку необходимого фронта очистных работ на выбросоопасных угольных пластах. Однако правила безопасности ограничивают длину заходки по углю на выбросоопасных пластах длиной не более 2 метров, так как в противном случае резко возрастает вероятность внезапного выброса угля и газа, что может привести к повреждению крепи выработки, оборудования, интенсивным обрушениям горных пород, что в целом делает горную выработку аварийной и непригодной для эксплуатации.

Анализ ведения буровзрывных работ при сотрясательном взрывании показывает, что перспективным направлением повышения эффективности буровзрывной технологии является использование в забое специальных насыпных породных пе-

ремычек, которые искусственно создаются в процессе проведения взрывных работ управляемым отбросом разрушаемой при взрыве породы и позволяют защитить горную выработку от возможного внезапного выброса угля. Поэтому исследования по отработке параметров технологии взрывных работ, позволяющих создавать такие защитные перемычки, являются актуальными и имеют важное научное значение.

Анализ последних исследований и публикаций показал, что при внезапном выбросе угля и газа происходит крайне быстрое разрушение призабойной части массива горных пород, их отторжение и формирование газо-угольного потока, быстро движущегося по выработке. Вследствие быстроты газодинамических явлений и их разрушающего действия на оборудование, крепь горных выработок, а также возможности создавать в выработке сильные ударные волны этот процесс характеризуют как газодинамический взрыв [1]. Поэтому при сотрясательном взрывании используются паспорта БВР, которые характеризуются не только выбором ВВ, состоянием между смежными шпурами, взрываемыми с оптимальным временем замедления, но и специальными приёмами

ведения взрывных работ. Одним из таких приёмов является проектирование таких параметров взрывания врубовых и отбойных шпуров и в такой последовательности, чтобы разрушенные породы при их отбросе формировали в забое насыпные перемычки для борьбы с выбросами, провоцируемыми при сотрясательном взрывании. В настоящее время «Инструкция по применению сотрясательного взрывания в угольных шахтах Украины» [2] рассматривает только способ проведения горных выработок по выбросоопасным породам с опережающим забоем уменьшенного сечения, когда взрывные работы выполняются как в опережающем забое, так и в отстающем за ним забое в один приём. При этом необходимо, чтобы отбитая порода отстающего забоя полностью перекрыла сечение опережающего забоя. Для уменьшения интенсивности и частоты выбросов предусматривается определённая последовательность отбойки породы забоя для создания защитной породной перемычки. Вместе с тем параметры такой защитной породной перемычки в данной «Инструкции ...» на угольных шахтах не оговорены. Поэтому обоснование параметров защитных породных перемычек для локализации внезапных выбросов при сотрясательном взрывании крайне важно.

Постановка задачи. Задачей данной работы является обоснование параметров насыпных породных перемычек для локализации внезапных выбросов угля при сотрясательном взрывании в смешанных забоях подготовительных горных выработок, проводимых по выбросоопасным угольным пластам.

Изложение материала и его результаты. Наиболее легко насыпные перемычки создаются для выбросоопасных угольных пластов при проведении смешанных забоев взрыванием за один приём, когда угольный пласт находится у почвы выработки (рис. 1). При этом в первую очередь взрывают шпуровые заряды ВВ в верхней породной подрывке, которые разрушают породу и формируют над угольным пла-

стом защитную противовыбросную перемычку необходимой толщины. После этого взрывают шпуровые заряды по уголю, которые могут провоцировать внезапный выброс. Однако данный выброс будет локализован защитной перемычкой. Вместе с тем следует дать обоснование необходимой толщины насыпной перемычки, исходя из объёма разрушаемых пород и «силы» возможного внезапного выброса угля и газа.

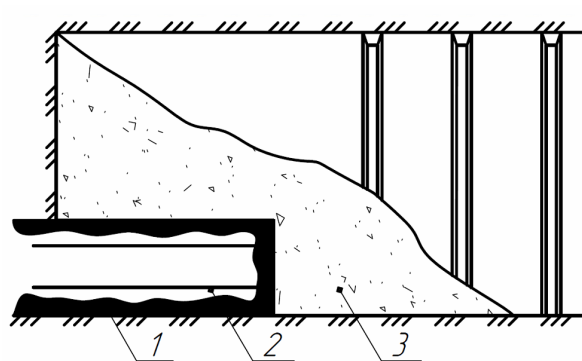
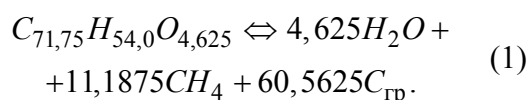


Рисунок 1 Схема формирования насыпной противовыбросной перемычки:

1 — угольный пласт; 2 — шпуровые заряды по уголю;
3 — насыпная перемычка из разрушенной породы верхней подрывки

На начальном этапе следует оценить предельную силу внезапного выброса и обосновать параметры, которые нужны для определения необходимой толщины защитной перемычки. В соответствии с исследованиями, проведёнными в работах [3, 4], начальное состояние макромолекулы выбросоопасного угля определено его составом, химическим строением и энергией образования ($Q_{обр}$). Конечное состояние, в которое может перейти макромолекула угля, связано с разрывом связей в молекуле и образованием новых связей, сопровождающихся выделением или поглощением энергии и изменением состава. Предельный случай изменения структуры макромолекулы угля при генерации углеводородов можно описать уравнением реакции его разложения. Рассмотрим протекание физико-химического процесса механохимической перестройки макромолеку-

лы на примере угля марки Ж пласта ℓ_1 шахты им. А. Ф. Засядько, приводящего к генерации углеводородов по следующему уравнению реакции [3]:



Теплота образования угля марки Ж пласта ℓ_1 равна $Q_{обр} = 802,4$ кДж/кг. Удельная теплота, которая выделяется в результате реакции (1), равна $Q_V = 1153,54$ кДж/кг, а температура продуктов реакции $T_{пр} = 662,3$ К. Этот процесс быстротечен, и энергия реакции расходуется на преодоление сдвиговой прочности вещества угольного пласта, разрушение угля и образование газо-пылеугольного потока [3].

На основании шахтных измерений продолжительности выбросов угля и газа И. В. Бобровым [5] было установлено, что скорость разрушения угля при выбросе составляет до 10 т/с. Этот факт и уравнение разложения угольного вещества (1) позволяют определить основные газодинамические параметры выброса газа в выработку. Для описания состояния газовых включений и определения внутреннего давления в выбросоопасном угольном пласте было использовано уравнение реального газа в вириальной форме [6]. Для реальных газов при высокой плотности это уравнение имеет следующий вид:

$$P_k = NRT\rho_k(1-\varepsilon) \cdot \left(1 + \frac{b_0}{V_y} + 0,625\frac{b_0^2}{V_y^2} + 0,287\frac{b_0^3}{V_y^3} + 0,193\frac{b_0^4}{V_y^4} \right), \quad (2)$$

где N — количество молей газообразных продуктов реакции;

R — газовая постоянная;

T — абсолютная температура;

ρ_k — плотность клатрата угольного пласта;

ε — относительная доля конденсированной фазы в клатрате;

b_0 — второй вириальный коэффициент для газа;

V_y — объём для «упаковки» молекул газа в клатрате угольного пласта.

Газ, заключенный в угольном клатрате, оказывает давление, направленное на разрыв клатрата изнутри. Разрыву газового клатрата препятствует давление вещающих пород и предел прочности на разрыв. Оценка устойчивости газового клатрата в угольном пласте при разрушении угля в таком случае представляет собой обобщенное условие:

$$P_k - P_z \leq [\sigma]_p, \quad (3)$$

где P_k — внутреннее давление газа в клатрате угольного пласта;

P_z — давление вмещающих пород на угольный пласт;

$[\sigma]_p$ — предел прочности угля на разрыв.

По уравнению (2) можно определить внутреннее давление газа в клатрате угольного пласта. Так, если принять плотность метастабильного газографитного клатрата после перестройки макромолекулы угля $\rho_k = 1075$ кг/м³, а абсолютную температуру угольного вещества $T = 300$ К при $\varepsilon = 0,66$ (доля конденсированной фазы), то остальные величины могут быть получены исходя из уравнения (2) и данных термодинамических свойств газов [7]. Для расчёта принято:

— удельный объём газографитного клатрата $V_k = \frac{1}{\rho_k} = 930,23$ см³/кг;

$$V_k = \frac{1}{\rho_k} = 930,23 \text{ см}^3/\text{кг};$$

— удельный объём каркаса клатрата из атомов углерода:

$$V_{y2} = 5,3 \cdot 55,2375 = 292,76 \text{ см}^3/\text{кг};$$

— удельный объём для «укладки» молекул газа в клатрате $V_y = V_k - V_{yк} = 637,47$ см³/кг;

— собственный удельный объём молекул газа:

$$b_0 = \sum b_i N_i = 33,95 \cdot 4,625 + 13,62 \cdot 5,325 + 18,63 \cdot 0,7 + 8,3 \cdot 10,4875 = 329,63 \text{ см}^3/\text{кг};$$

– отношение $\frac{b_0}{V_y} = \frac{329,63}{637,47} = 0,517$.

Подставляя все значения в уравнение (3), получаем внутреннее давление газа в клатрате угольного пласта:

$$P_k = 3,3481 \cdot 10^7 \text{ Па.}$$

Согласно условию (3), если происходит разгрузка пласта, напряжение, передаваемое породами на угольный пласт, снижается и стремится к нулю, тогда при выполнении условия $P_k \geq [\sigma]_p$ газовый клатрат в угольном веществе разрушается. В этом случае сплошность угольной среды нарушается и образуется газозольный поток, движущийся в направлении свободного объема выработки. Плотность этого потока (ρ_n) для адиабатического процесса истечения газа может быть определена по формуле:

$$\rho_n = \rho_k \left(\frac{[\sigma]_p}{P_k} \right)^{\frac{1}{\gamma_n}},$$

где γ_n — показатель адиабаты для смешанного метано-угольного потока, определяемый по формуле:

$$\begin{aligned} \gamma_n &= 0,66\gamma_{sp} + 0,34\gamma_r; \\ \gamma_n &= 0,66 \cdot 1,05 + 0,34 \cdot 1,342 = 1,15. \end{aligned}$$

Принимаем, что при сдвиговой деформации угольного вещества критический предел его прочности на разрыв мало отличается от сдвиговой прочности угля. Средний предел прочности на разрыв для угольного вещества $[\sigma]_p = 1,0$ МПа. Тогда плотность газозольного потока при выбросе $\rho_n = 50,68 \text{ кг/м}^3$. Если выброс происходит в подготовительной горной выработке, и скорость разрушения угля в пласте принять равной 10 т/с, то скорость газозольного потока (u_n) можно установить из уравнения:

$$u_n = \frac{10000}{S_{nl}\rho_n}, \text{ м/с,}$$

где S_{nl} — критическое сечение угольного пласта, через которое истекает газозольный поток: $S_{nl} = 0,5 \text{ Вм}_{nl}$;

B — ширина выработки по почве пласта, м;

m_{nl} — средняя мощность пласта, м.

Для пластов средней мощности, равной 1,5 м, можно принять $S_{nl} = 4,0 \text{ м}^2$. Тогда средняя скорость газозольного потока у забоя выработки составит:

$$u_n = 10000 / (4 \cdot 50,68) = 49,33 \text{ м/с.}$$

За единицу времени угольный поток при истечении займёт объём выработки, равный:

$$V_{св} = S_{св} u_n \approx 900, \text{ м}^3,$$

где $S_{св}$ — сечение выработки в черне, м^2 ; принято $S_{св} = 18 \text{ м}^2$.

Объём газа, который выделяется за это время из угольного вещества в объёме выработки, равен:

$$V_{газа} = 10 \cdot 473,48 \approx 4750 \text{ м}^3.$$

Для адиабатического процесса расширения газа его давление будет равно:

$$\begin{aligned} P_2 &= P_a \left(\frac{V_{газа}}{V_{св}} \right)^{\gamma_2} = \\ &= 1,02 \cdot 10^5 \left(\frac{4750}{900} \right)^{1,342} \approx 10^6 \text{ Па.} \end{aligned}$$

Скорость расширения газа может быть установлена из риманского решения основных уравнений гидродинамики [8]. Это решение основано на предположении, что $u_2 = \varphi(V_2)$, где V_2 — удельный объём газа, u_2 — скорость газа. Для идеального газа в работе [8] получено решение этого уравнения:

$$u_2 = u_0 + \frac{2}{\gamma_2 - 1} (C - C_0), \quad (4)$$

где u_0 — начальная скорость газа;

C — скорость звука в расширяющемся газе;

C_0 — скорость звука в невозмущенной атмосфере, $C_0 = 340$ м/с.

При истечении газа в атмосферу его скорость звука может быть найдена из выражения:

$$C = 340 \left(\frac{P_e}{P_a} \right)^{\frac{\gamma_e - 1}{2\gamma_e}} = \\ = 340 \left(\frac{10^6}{1,02 \cdot 10^5} \right)^{0,1274} = 453 \text{ м/с.}$$

По уравнению (4) находим скорость расширения газа: $u_e = 708,1$ м/с.

Скорость расширения газа сверхзвуковая, поэтому в выработке газ начнет сжимать воздух, и в нём образуется ударная волна. Давление ударного сжатия воздуха во фронте волны равно:

$$P_{yв} = \frac{\gamma_e + 1}{2} \rho_e u_e^2 = \\ = \frac{1,4 + 1}{2} \cdot 1,253 \cdot 708,1^2 = 7,5 \cdot 10^5 \text{ Па,}$$

где γ_e , ρ_e — показатель адиабаты и плотность шахтного воздуха соответственно.

Скорость ударной волны в воздухе определяется по формуле

$$D_{yв} = 315,4 \left(1,46245 + \frac{P_{yв}}{P_a} \right)^{0,49305} = 925 \text{ м/с,}$$

а температура ударного сжатия газа во фронте ударной волны равна:

$$T_{\phi} = T_0 - 12,061 + 0,03436 D_{yв} + \\ + 4,4974 \cdot 10^{-4} D_{yв}^2 - 6,872 \cdot 10^{-8} D_{yв}^3 = 650 \text{ К.}$$

Результаты аналитических исследований показали, что выброс угля и газа имеет взрывоподобный характер, аналогичный взрыву, в результате которого в выработке образуется мощная ударная волна.

Таким образом, нами установлены все параметры метано-угольного потока при внезапном выбросе угля и газа. Эти пара-

метры позволяют установить объёмную плотность энергии потока, равную половине произведения плотности метано-угольного потока на квадрат скорости его движения. Для надёжной насыпной породной перемычки выбран параметр, определяющий её защитное и локализирующее действия в виде веса, определяющего её инерционные свойства при сопротивлении действию потока при внезапном выбросе:

$$P = V_n \rho_n g.$$

Тогда для локализации внезапного выброса необходимо выполнение условия, когда перемычка утилизирует всю энергию потока за счёт своих инерционных свойств. Это позволяет получить уравнение для толщины породной перемычки (Δ):

$$\Delta = m_{нл} \sqrt{\frac{\rho_{ном} u_{ном}^2 F_{нл}}{2 V_n K_p K_c \rho_n g}}, \quad (5)$$

где $m_{нл}$ — мощность пласта, м;

$\rho_{пот.}$ — плотность газоугольного потока при выбросе, кг/м³;

$u_{пот.}$ — скорость газоугольного потока при выбросе, м/с;

$F_{пл.}$ — площадь пласта, м²;

V_n — объём породной перемычки, необходимый для сопротивления выбросу, м³;

K_p — коэффициент разрыхления породы;

K_c — коэффициент трения-сцепления кусков разрушенной породы;

ρ_n — плотность породы, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с².

Для принятых условий и параметров внезапного выброса по уравнению (5) сделан расчёт толщины породной перемычки для локализации внезапного выброса угля и газа. Для приведённых выше значений параметров и длины шпуров 2 м при сотрясательном взрывании определено, что толщина породной перемычки должна быть не менее 0,5 метра. Это вполне достижимое значение толщины перемычки даже с учётом отброса породы при взрывных работах.

Формирование насыпной противовыбросной породной перемычки необходимой толщины при проведении выработок по выбросоопасным пластам может обеспечиваться использованием подвешенного экрана из отрезков конвейерной ленты, что позволит предотвратить чрезмерный разлет породы при разрушении верхней породной подрывки. При этом необходимо учитывать достаточность объёма разрушаемой породы с учётом коэффициента её разрыхления при разрушении взрывом для формирования перемычки необходимой толщины.

Выводы и направление дальнейших исследований. В результате изучения процесса газодинамических явлений на выбросоопасных угольных пластах определены основные параметры внезапного выброса и необходимые для защиты горной

выработки от действия газо-угольного потока параметры защитной перемычки.

Предложена последовательность взрывания шпуров в смешанном забое при сотрясательном взрывании, предусматривающая первоочередное взрывание пород верхней подрывки для создания защитной насыпной породной перемычки необходимой толщины, позволяющей локализовать внезапный выброс угля и газа в забоях проводимых подготовительных горных выработок на выбросоопасных угольных пластах.

Дальнейшие работы необходимо проводить в направлении разработки специальных паспортов БВР в режиме сотрясательного взрывания, которые учитывают соотношение породной и угольной части забоя выработки для оптимизации объёма пород и создания надёжной защитной насыпной перемычки.

Библиографический список

1. Калякин, С. А. Оценка взрывобезопасности забоев горных выработок при выбросах и сотрясательном взрывании [Текст] / С. А. Калякин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах : сборник научных трудов. — Макеевка : Изд-во МакННН, 2008. — Вып. 22. — С. 39–54.
2. Инструкция по применению сотрясательного взрывания в угольных шахтах Украины [Текст]. — Макеевка : изд-во «МакННН-Донбасс», 1994. — 46 с.
3. Калякин, С. А. Механизм образования взрывоопасной среды и её детонации в зонах метастабильного состояния угольного вещества [Текст] / С. А. Калякин // Вести Донецкого горного института. — Донецк : Изд-во ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. — С. 27–34.
4. Калякин, С. А. Борьба со взрывами метана на выбросоопасных угольных пластах [Текст] / С. А. Калякин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах : сборник научных трудов. — Макеевка : Изд-во МакННН, 2007. — Вып. 20. — С. 15–25.
5. Бобров, И. В. Проведение подготовительных выработок на пластах, опасных по выбросам угля и газа [Текст] / И. В. Бобров. — Макеевка : изд-во «Макеевка-Донбасс», 1959. — 200 с.
6. Розловский, А. И. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами [Текст] / А. И. Розловский. — М. : Изд-во Химия, 1972. — 364 с.
7. Гурвич, Л. В. Термодинамические свойства индивидуальных веществ [Текст] / Л. В. Гурвич и др. — М. : Изд-во Наука, 1978. — 496 с.
8. Ландау, Л. Д. Определение скорости истечения продуктов детонации некоторых газовых смесей [Текст] / Л. Д. Ландау, К. П. Станюкович // Собрание трудов Л. Д. Ландау. — М. : Изд-во Наука, 1969. — С. 496–498.

© Калякин С. А.

© Лабинский К. Н.

© Азаматов Р. И.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СЗПСИГ ДонНТУ Борщевским С. В.,
к.т.н., доц. каф. СГ ДонГТУ Смекалыным Е. С.*

Статья поступила в редакцию 29.05.18.

д.т.н. Калякін С. О., д.т.н. Лабінський К. М., Азаматов Р. І. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР)

ЛОКАЛІЗАЦІЯ РАПТОВИХ ВИКИДІВ У ЗАБОЯХ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК ПРИ СТРУСНОМУ ПІДРИВАННІ

Вивчено процес локалізації раптового викиду вугілля та газу насипними породними перемичками у забоях підготовчих гірничих виробок, що проводяться, на викидонебезпечних вугільних шарах при струсному підриванні. Визначено параметри раптового викиду та необхідні для захисту гірничої виробки від дії газо-вугільного потоку параметри захисної перемички. Встановлено необхідну товщину породної перемички для захисту гірничої виробки та локалізації раптового викиду при струсному підриванні у підготовчих вибоях гірничих виробок, що проводяться по змішаних викидонебезпечних вибоях.

Ключові слова: аналітичні дослідження, газовий клатрат, газо-вугільний потік, захисна породна перемичка.

Doctor of Tech. Sc. Kaliakin S. A., Doctor of Tech. Sc. Labinskiy K. N., Azamatov R. I. (DonNTU, Donetsk, DPR)

LOCALIZATION OF SUDDEN OUTBURST IN WORKING FACES AT SHOCK BLASTING

There has been studied the localization process of sudden coal and gas outburst by the earth-fill rock cofferdams in the preliminary face development on the outburst-prone coal seams at shock blasting. There have been determined the sudden outburst parameters and the required security jumper to protect the working face from the gas-coal flow activity. There have been determined the required cofferdam thickness and the working face protection and sudden outburst localization at shock blasting in the preliminary working face undertaken in the mixed outburst-prone face.

Key words: analytical studies, gas clathrate, gas-coal flow, security rock jumper.

УДК 622.411.332:533.17

*к.т.н. Денисенко В. П.,
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)*

ВЛИЯНИЕ МАЛОАМПЛИТУДНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ МАССИВА НА ДИНАМИКУ МЕТАНООБИЛЬНОСТИ ВЫРАБОТОК ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА

Приведены результаты изучения фактической метанообильности выработок выемочных участков при отработке угольных пластов в зонах тектонически дислоцированного угленосного массива. Экспериментально установлены закономерности и предложена зависимость изменения метанообильности выработок выемочного участка от параметров малоамплитудных тектонических нарушений.

Ключевые слова: угольная шахта, метанообильность, угленосный массив, тектонические нарушения, прогноз.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Увеличение выделения метана в угольных шахтах по мере углубления горных работ, рост производительности очистных и темпов продвижения подготовительных выработок всё чаще приводят к несоответствию между вентиляционными возможностями шахт и их газовым темпераментом. Надёжный и точный прогноз ожидаемой метанообильности горных выработок является основой для разработки мероприятий по борьбе с метаном и выбора их рациональных параметров на стадии проектирования и способов оперативного управления метановыделением в процессе ведения горных работ.

Установлено, что при ведении горных работ в зонах геологических нарушений изменение выделения метана в горные выработки имеет различный характер и может достигать довольно высоких значений. Вместе с этим недостаточно разработаны методические основы прогноза выделения метана в зонах тектонических нарушений с учётом их генотипа и параметров пространственного расположения, вследствие чего прогноз метановыделения с необходимой точностью не осуществляется [1].

Особенностью геологического строения угольных месторождений является высокая степень нарушенности угленосного массива, которая представлена широким спек-

тром разнотипных разрывных и пликативных дислокаций. Часто естественными границами шахтных полей или их отдельных частей являются крупноамплитудные разрывы, которые разделяют шахтное поле на отдельные тектонические блоки. Внутри блоков развиты серии средне- и малоамплитудных разрывных нарушений и локальных пликативных структур, генетически связанных с крупными дислокациями.

Основным результатом тектонической деятельности является образование направленной трещиноватости в газосодержащих породах, которая повышает их газопроницаемость и способствует формированию зон скопления метана и повышенной газоотдачи в горные выработки. Такие зоны являются наиболее опасными при вскрытии и пересечении их горными выработками, но они наиболее благоприятны для извлечения газа метана средствами дегазации.

Исследованиями, проведёнными в МакНИИ на примере шахт Донецко-Макеевского района, установлено влияние крупных геологических разрывных и складчатых нарушений на метанообильность выемочных участков, ведущих очистную выемку в зонах влияния этих нарушений [2]. На основании сопоставления величины расчётной и фактической метанообильности выработок выемочного уча-

стка получены количественные зависимости для различных генетических типов нарушений. Для проведения расчётов метанообильности горных выработок рекомендуются числовые значения поправочных коэффициентов, учитывающие изменения метанообильности выемочных участков при подходе к зонам дробления пород, сопутствующим этим нарушениям.

Цель исследований. Выявление возможности прогноза метанообильности выработок выемочного участка при пересечении лавами зон малоамплитудных нарушений за счёт использования закономерностей выделения метана из нарушенного массива для обеспечения газовой безопасности выемочных участков.

Постановка задачи. Задача данного исследования — определить численное значение величины относительного приращения (убыли) газовыделения за счёт фактора нарушенности в общей газообильности выработок и установить количественные зависимости этого показателя от пространственного расположения забоя выработки относительно центральной части нарушенной зоны.

Изложение материала и его результаты. Для изучения изменений метанообильности выработок выемочного участка при пересечении лавами зон тектонических малоамплитудных нарушений проводились многолетние наблюдения на шахтах Донбасса в различных геологических условиях залегания угольных пластов. Чтобы исключить влияние других факторов, использовались данные о метанообильности горных выработок вне зон влияния нарушений. Для этого изучалась геологическая документация нарушенных выемочных полей, расчёт метанообильности проводился по данным плановых замеров концентрации метана и количества воздуха, проходящего через лаву, учитывалась среднемесячная нагрузка на очистной забой.

Анализ результатов исследований показал, что метанообильность горных выработок вне зависимости от генетического типа малоамплитудного нарушения зако-

номерно возрастает при пересечении последнего забоем, достигает максимального значения примерно в срединной части нарушения, далее закономерно снижается. Степень превышения метанообильности в зоне нарушения по сравнению с исходной зоной зависит от амплитуды разрывного нарушения и угла встречи забоя с плоскостью пересекаемого нарушения.

Так, в условиях шахты «Комиссаровская» Селезневского района Донбасса в различные годы отрабатывался пласт 1₆, сложенный тощим углём с природной метаноносностью 15–25 м³/т. При выемке 4 западной лавой 4 горизонта столба по простиранию проходило нарушение в виде взброса с амплитудой смещения 1,1 м под углом 30° к линии очистного забоя. Метанообильность лавы вне нарушенной зоны составила 2,1 м³/мин. В момент встречи нарушения метанообильность повысилась до 3,68 м³/мин. Максимального значения (6,8 м³/мин) метанообильность достигла в срединной части нарушения и оставалась на этом уровне при подвигании лавы на 70 м. При выходе лавы из нарушения метанообильность составила 6,1 м³/мин. Метанообильность выемочного участка в нарушенной зоне была выше в 3,3 раза в сравнении с ненарушенной.

2-й восточной лавой пласт отрабатывался по восстанию. Лавой проходила серия нарушений в виде микросбросов со смещением от 0,3 м до 0,75 м. Вне нарушенной зоны метанообильность составила 1,73 м³/мин, в зоне нарушения — 3,9 м³/мин, превышение — 2,2 раза. Аналогичное положение наблюдалось и в 2-х других лавах, где пересекались нарушения с амплитудой 0,3–0,9 м. При этом метанообильность в нарушенных зонах в среднем увеличилась в 2,5 раза.

При отработке пласта k₃ в условиях шахты им. Кирова Марьевского района лавой 44 встречено продольное нарушение в виде взброса с переменной амплитудой от 0,3 до 1,1 м. В исходной зоне метанообильность составила 1,6 м³/мин, при входе в нарушение (амплитуда 0,3 м) — 1,65 м³/мин, при

амплитуде смещения 0,8 м метанообильность увеличилась до 2,7 м³/мин, при 1,0 м — 3,8 м³/мин, максимальная — 4,1 м³/мин при амплитуде 1,1 м. В нарушенной зоне метанообильность максимально возросла в 2,6 раза.

На шахте им. Мельникова в Лисичанском районе при отработке пласта l₄ 9 южной лавой в начале выемочного столба проходила серия нарушений с амплитудой 0,4–0,6 м, практически параллельных очистному забою. При этом максимальная метанообильность составила 6,9 м³/мин и превысила исходную в 2,5 раза.

В условиях шахты им. В. Р. Менжинского Первомайского района при отработке пласта l₆ 1 северной лавой пересекалась серия нарушений на всём протяжении выемочного столба с амплитудами от 0,5 до 1,2 м. Максимального превышения (в 3 раза) метанообильность достигла при пересечении нарушения с амплитудой 1,2 м.

Приведённые данные являются только небольшой частью типичных примеров влияния нарушенности на метанообильность очистных выработок.

Выделение метана из нарушенного массива пород почвы и кровли происходит, как правило, в выработанном пространстве лавы в виде суфляров второго рода, обеспечивая повышенную метанообильность выработок участка с исходящей струей вентиляционного воздуха.

Экспериментально установлено [3, 4], что ожидаемая абсолютная метанообильность выработок выемочного участка на ненарушенном участке пласта, при прочих равных условиях разработки, зависит от нагрузки на очистной забой и описывается уравнением вида:

$$I = I_0 + B \cdot A, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (1)$$

где I_0 — фоновый уровень метановыделения, численно равный уровню метанообильности горной выработки при временной остановке очистных работ, м³/мин;

B — темп нарастания метанообильности от увеличения темпа выемки угля, м³/мин/т/сут.;

A — среднесуточная нагрузка на очистной забой, т/сут.

В общем виде изменение динамики выделения метана в выработки выемочного участка на интервалах нарушенной зоны описывается зависимостью вида [5]:

$$I_H = a \cdot L^c \cdot e^{-b \cdot L} + I_{\text{и}}, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (2)$$

где a , b , c — эмпирические коэффициенты уравнения регрессии;

L — расстояние от места вскрытия лавой тектонического нарушения до линии очистного забоя, м;

$I_{\text{и}}$ — исходная метанообильность выемочного участка при его работе в ненарушенной зоне, м³/мин.

Значения эмпирических коэффициентов принимаются в зависимости от параметров тектонических нарушений:

$$a = \frac{I_{\text{max}} \cdot e}{L_{\text{max}}}, \quad (3)$$

где I_{max} — максимальное газовыделение в нарушенной зоне, м³/мин [5];

L_{max} — протяжённость зоны нарушения пород по ходу движения лавы, м;

$$b = \frac{1}{L_{\text{max}}}. \quad (4)$$

Значения коэффициента $c = 1-1,2$.

Выделение дополнительных объёмов метана в выработки выемочного участка происходит в результате вскрытия сформированной зоны скопления метана в трещинах нарушенных пород и повышенной их газоотдачи. Выделение метана в очистной забой непосредственно из зоны нарушения часто происходит в виде суфляров, внезапных выбросов угля и газа, внезапном выдавливании угля с повышенным метановыделением, то есть в виде газодинамических явлений.

Особенностью метановыделения из тектонически нарушенного угленосного массива является увеличение исходного фонового уровня метанообильности горных выработок, тогда:

$$I_0 = I - B \cdot A, \text{ м}^3/\text{мин}. \quad (5)$$

В зоне тектонических нарушений фоновый уровень метанообильности выработок определяется по формуле:

$$I_0 = a \cdot L^c \cdot e^{-b \cdot L}, \text{ м}^3/\text{мин.} \quad (6)$$

Зависимость степени превышения метанообильности выработок в нарушенной зоне в сравнении с ненарушенным участком при учёте зависимости (3) принимает вид:

$$\alpha_m = \frac{I_0}{I_{0И}} = 1 + \frac{a \cdot L^c \cdot e^{-b \cdot L}}{I_{0И}}, \text{ м}^3/\text{мин.} \quad (7)$$

где $I_{0И}$ — фоновый уровень метанообильности при работе лавы на ненарушенном участке пласта, $\text{м}^3/\text{мин.}$

Прогноз динамики метанообильности выемочного участка при его работе в нарушенной зоне осуществляется в следующем порядке: проводится расчёт средней ожидаемой метанообильности на ненарушенном участке пласта; определяется исходный фоновый уровень метанообильности выработок на ненарушенном участке пласта; определяется фоновый уровень метанообильности на различных интервалах нарушенных пород (размер интервала принимается равным месячному подвиганию лавы при проектной нагрузке на очистной забой); устанавливается степень превышения фонового

уровня метанообильности в нарушенной зоне над исходным; определяется ожидаемая метанообильность выработок на разных интервалах нарушенной зоны.

Реализация предложенной модели процесса формирования метанообильности в выработках выемочного участка была выполнена для условий отработки пласта k_3 шахты им. С. М. Кирова лавой № 44 в тектонически нарушенной зоне.

Предложенная модель позволила получить удовлетворительную сходимость прогнозной величины метанообильности горных выработок с фактической при числовых значениях коэффициентов, равных:

$$a = 4,7 \cdot 10^{-2}; b = 5,1 \cdot 10^{-3}; c = 1,1.$$

Относительная погрешность прогнозных значений метанообильности составила 7,8 %.

Выводы. Для проектирования вентиляции выработок выемочного участка при работе лавы в зоне развития тектонических нарушений в расчёте расхода воздуха предлагается принимать максимальное значение прогнозной метанообильности, полученное в зоне нарушения.

В пределах нарушенной зоны необходимо применять скважинную дегазацию массива кровли и почвы и увеличивать плотность бурения дегазационных скважин.

Библиографический список

1. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт / Государственный нормативный акт об охране труда 1.130-6.09.93 — К. : Основа, 1994. — 311 с.
2. Кузьмин, Д. В. О метанообильности выемочных участков в зонах геологических нарушений [Текст] / Д. В. Кузьмин, С. Н. Недвига // Уголь Украины. — 1988. — № 6. — С. 32–33.
3. Денисенко, В. П. Совершенствование горно-статистического метода прогноза метанообильности горных выработок добычных участков [Текст] / В. П. Денисенко, Г. Л. Пигида, Е. В. Абакумова, В. А. Маркин, Е. П. Анненков // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах : сб. науч. тр. МакННН. — Макеевка : МакННН, 2008. — Вып. 2 (22). — С. 63–75.
4. Захаров, В. Н. Угленородные массивы : прогноз устойчивости, риски, безопасность [Текст] / В. Н. Захаров, В. С. Забурдяев, В. Б. Артемьев. — М. : изд. «Горное дело», ООО «Киммерийский центр», 2013. — С. 152–158.
5. Денисенко В. П. О метанообильности очистных выработок в зонах малоамплитудной нарушенности пластов / В. П. Денисенко // Сборник научных трудов ДГМИ. — Алчевск: ДГМИ, 1998. — Вып. 8 — С. 61–64.

© Денисенко В. П.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Леоновым А. А.,
гл. инженером Филиала «Шахта Никонор-Новая» Чепурным Д. С.*

Статья поступила в редакцию 01.06.18.

к.т.н. Денисенко В. П. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

**ВПЛИВ МАЛОАМПЛІТУДНИХ ТЕКТОНІЧНИХ ПОРУШЕНЬ МАСИВУ
НА ДИНАМІКУ БАГАТОМЕТАНОВОСТІ ВИРОБОК ВИЙМАЛЬНОЇ ДІЛЯНКИ**

Наведено результати вивчення фактичної багатометановості виробок виїмкової ділянки при відробці вугільних пластів у зонах тектонічно дислокованого вуглепородного масиву. Експериментально встановлено закономірності та запропоновано залежність зміни багатометановості виробок виїмкової ділянки від параметрів малоамплітудних тектонічних порушень.

Ключові слова: *вугільна шахта, багатометановість, вуглепородний масив, тектонічні порушення, прогноз.*

Ph.D. Denisenko V. P. (DonSTU, Alchevsk, LNR)

**INFLUENCE OF SMALL-AMPLIFIED TECTONIC BREAKDOWNS OF THE MASSIVE
ON THE DYNAMICS OF THE METHAN-BEARING CAPACITY IN THE WORKINGS
OF THE CUTTING SITE**

The results of studying the actual methane-bearing capacity of excavation site during the coal seams mining in the areas of tectonically dislocated coal-bearing massif are given. The regularities were experimentally determined and the dependence of changing the methane-bearing capacity of the excavation site on the parameters of low-amplitude tectonic disturbances was proposed.

Key words: *coal mine, methane metabolism, coal-rock massif, tectonic disturbances, forecast.*

УДК 622.834:622.273.21

к.т.н. Павлов Е. Е.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ЗАБУТОВКИ ЗАКРЕПНОГО ПРОСТРАНСТВА НА ПАССИВНЫЙ ОТПОР ПОРОД ВОКРУГ ВЫРАБОТОК

Методом конечных элементов изучены закономерности изменения величины и зон пассивного отпора рамной крепи горной выработки при различных схемах нагружения в зависимости от изменения плотности забутовки закрепного пространства.

Ключевые слова: подготовительная выработка, арочная крепь, закрепное пространство, пассивный отпор, коэффициент постели, метод конечных элементов.

При проведении подземных горных работ неотъемлемой частью процесса крепления является забутовка различными материалами (дроблёная горная порода, сыпучие материалы, тампонажные растворы, вспенивающиеся податливые пены и др.) закрепного пространства, т. е. пространства между контуром горной выработки и рамной крепью. Забутовка необходима для передачи нагрузок со стороны массива горных пород на крепь и обеспечения требуемой работоспособности рамной крепи. На работоспособность существенно влияет качество заполнения закрепного пространства, которое напрямую зависит от механизации процесса крепления. Как показали исследования [1], вокруг крепи выработки часто забутовки закрепного пространства нет или наблюдается её плохое качество, т. к. заполнение пустот в закрепном пространстве не механизировано, а выполняется вручную.

В работе [2] представлен способ, который обеспечивает равномерное заполнение пустот закрепного пространства и повышает работоспособность крепи. Сущность способа взрывной разгрузки пород кровли (ВРПК) состоит в том, что за счёт правильного размещения разгрузочных шпуров вокруг выработки можно обеспечить различные схемы нагрузок на рамную крепь со стороны массива: равномерно распределённую (рис. 1, а), параболическую (рис. 1, б) и нагрузку по закону треугольника (рис. 1, в), когда максимальное нагружение происходит на стойки крепи, а минимальное — в центре верхняка.

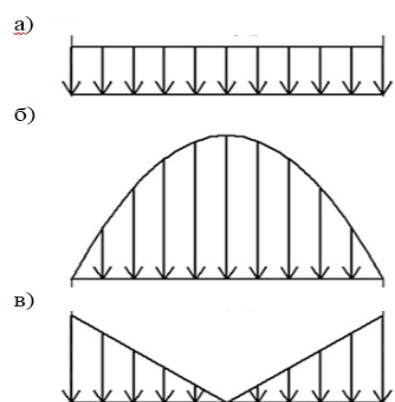


Рисунок 1 Схемы распределения нагрузки на арочную крепь

В процессе проявлений горного давления по мере роста смещений пород кровли в той части периметра рамы крепи, которая смещается в сторону массива и вступает в контакт с ним через забутовку закрепного пространства, возникает пассивный отпор пород. Последний препятствует деформациям крепи и тем самым значительно повышает её работоспособность.

В работе [3] исследовано влияние пассивного отпора пород на работоспособность арочной рамной крепи. Автор отмечает, что рамная крепь выработок одной и той же конструкции может иметь, в зависимости от реализованной схемы приложения со стороны массива пород внешней нагрузки и обеспечения плотности контактов через забутовку закрепного пространства, необычайно широкий диапазон колебаний работоспособности.

До настоящего времени не раскрыт вопрос, как влияет плотность забутовки закрепного пространства на пассивный отпор пород вокруг выработок при различной схеме нагружения на рамную крепь, поэтому целью исследований является установление закономерности изменения пассивного отпора пород вокруг выработки при создании забутовки закрепного пространства способом взрывной разгрузки пород кровли. Задача исследования — изучение влияния плотности забутовки при различных схемах нагружения рамной крепи на область и величину изменения пассивного отпора пород. Объект исследования — пассивный отпор пород в условиях изменяемой плотности закрепного пространства и различного нагружения со стороны массива пород на рамную крепь, а предмет исследования — закономерности изменения пассивного отпора пород от разгруженной зоны при различных схемах нагружения на рамную крепь.

Для решения поставленных задач использовался метод конечных элементов, реализуемый с помощью программного комплекса «Лира». Свойства породной забутовки выражались через модель коэффициента постели, или модель Винклера.

Коэффициент постели иногда называют модулем упругости основания. Другими словами, забутовку закрепного пространства, которая складывается из разрушенных пород массива, можно рассматривать как совокупность близко расположенных независимых упругих пружин заданной жёсткости. Следовательно, коэффициент постели приравнивается к жёсткости пружин 1 (рис. 2) и является мерой жёсткости забутовки закрепного пространства, которая представляет собой разрушенные взрывом породы. Подобная идеализация вполне допустима и широко применяется в инженерной практике, в частности при решении задач об изгибе балок на упругом основании.

Основное допущение модели Винклера отражается известной пропорциональной зависимостью

$$q(\alpha) = k_{\Pi} \cdot U(\alpha), \quad (1)$$

где $q(\alpha)$ — нормальное давление на грунтовое основание в точке по углу α (рис. 2), Н/м²; k_{Π} — коэффициент постели, характеризующий жёсткость упругого основания, Н/м³=Па/м; $U(\alpha)$ — осадка основания в точке по углу α плоскости контакта рамы и основания, м.

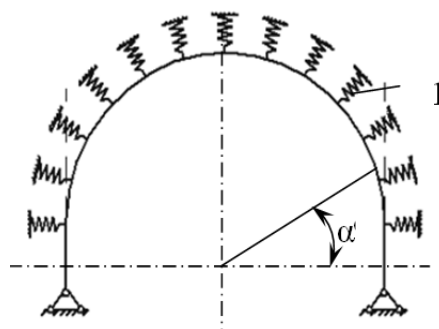


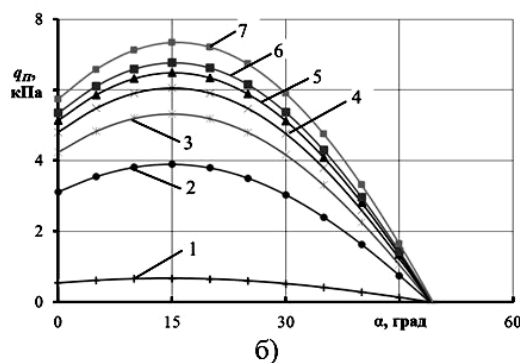
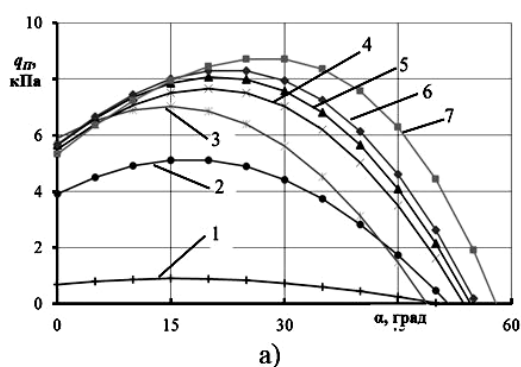
Рисунок 2 Расчётная схема крепи с пассивным отпором пород

При исследовании влияния пассивного отпора на работоспособность арочной крепи авторами работы [3] принят диапазон изменения коэффициента постели k_{Π} в пределах от 0 МПа/м (отсутствие забутовки и отпора пород) до 5 МПа/м. Дальнейшее увеличение жёсткости забутовки (более 5 МПа/м) не сказывалось на несущей способности крепи. На данном этапе исследований принимается простейший случай однородной жёсткости забутовки, когда коэффициент постели k_{Π} в зоне забутовки, состоящей из разрушенных пород, одинаков и колеблется от 0 МПа/м до 5 МПа/м.

На графиках (рис. 3, 4) показано, как изменяется пассивный отпор пород q_{Π} по контуру крепи от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 90^\circ$ (см. рис. 2) в зависимости от разгруженной от напряжений зоны пород. Так, при сосредоточенной нагрузке видно, что пассивный отпор возникает от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 60^\circ$ (рис. 3, а); при взрыве одного заряда рыхления пассивный отпор возникает от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 50^\circ$ (рис. 3, б); при взрыве двух зарядов

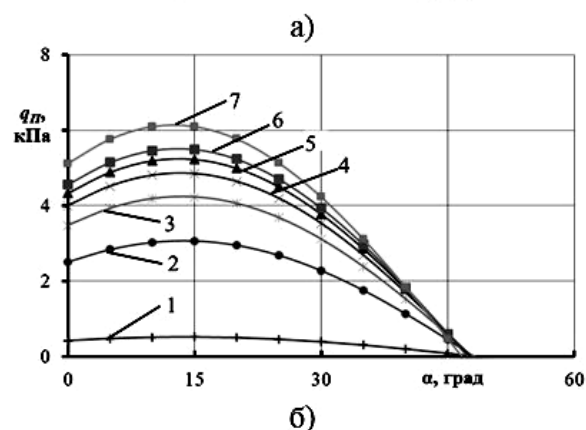
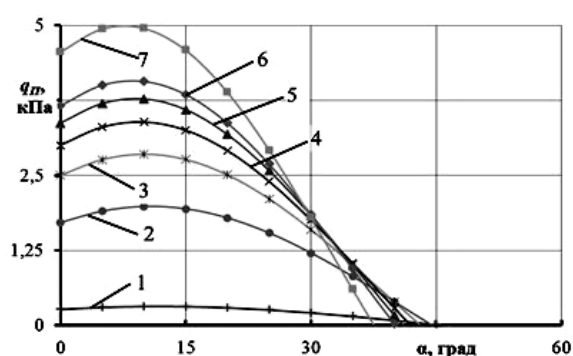
рыхления пассивный отпор возникает от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 35^\circ \dots 45^\circ$ (рис. 4, а) в зависимости от его величины; при взрыве трёх зарядов рыхления пассивный отпор возникает от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 50^\circ$ (рис. 4, б). Можно заметить, что во всех случаях пассивный отпор происходит от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 35^\circ \dots 55^\circ$, т. е. до узлов податливости крепи.

Пассивный отпор изменяется в зависимости от жёсткости закрепного пространства, которая описывается коэффициентом постели k_{II} . По мере увеличения коэффициента постели от $k_{II} = 0,05 \text{ МПа/м}$ до $k_{II} = 5 \text{ МПа/м}$ пассивный отпор при взрыве двух (рис. 4, а) зарядов рыхления с максимумом изгибающего момента при $\alpha = 7^\circ$ возрастает от $q_{II} = 0,3 \text{ КПа}$ до $q_{II} = 5 \text{ КПа}$.



- 1 — $k_{II}=0,05 \text{ МПа/м}$; 2 — $k_{II}=0,5 \text{ МПа/м}$;
3 — $k_{II}=1,0 \text{ МПа/м}$; 4 — $k_{II}=1,5 \text{ МПа/м}$;
5 — $k_{II}=2 \text{ МПа/м}$; 6 — $k_{II}=2,5 \text{ МПа/м}$;
7 — $k_{II}=5 \text{ МПа/м}$

Рисунок 3 Графики зависимости изменения пассивного отпора пород от разгруженной зоны при сосредоточенной (а) и параболической (б) нагрузке



- 1 — $k_{II}=0,05 \text{ МПа/м}$; 2 — $k_{II}=0,5 \text{ МПа/м}$;
3 — $k_{II}=1,0 \text{ МПа/м}$; 4 — $k_{II}=1,5 \text{ МПа/м}$;
5 — $k_{II}=2 \text{ МПа/м}$; 6 — $k_{II}=2,5 \text{ МПа/м}$;
7 — $k_{II}=5 \text{ МПа/м}$

Рисунок 4 Графики зависимости изменения пассивного отпора пород от разгруженной зоны пород при нагрузке по закону треугольника (а) и равномерно распределенной (б)

Такая особенность распределения пассивного отпора объясняется тем, что при взрыве двух зарядов ВВ участки активной нагрузки смещены к области замков податливости ($\alpha = 45^\circ$). Все остальные схемы распределения пассивного отпора пород при других схемах разгрузки показывают большую неравномерность деформации крепи, а поэтому малоэффективны.

Обобщая полученные результаты в виде графиков пассивного отпора пород, можно заключить, что показателем эффективности работы крепи является размер участка пассивного отпора: чем этот участок меньше, тем более равномерно загружена крепь и тем выше её работоспособность.

Выводы:

1. Наиболее эффективным является распределение нагрузки на рамную крепь по закону треугольника (рис. 1, в), при котором обеспечивается минимальный размер ($0 \leq \alpha \leq 35^\circ \dots 45^\circ$) участка пассивного отпора.

2. Показано, что наиболее оптимальным вариантом способа ВРПК является взрывание двух зарядов рыхления в массиве со стороны узлов податливости рамы крепи [4], при котором обеспечивается минимальный размер участка пассивного отпора.

Библиографический список

1. Павлов, Е. Е. Анализ негативных последствий переборов при проходке горных выработок [Текст] / Е. Е. Павлов // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — Алчевск : ДонГТУ, 2009. — Вып. 28. — С. 125–133.
2. Литвинский, Г. Г. Повышение работоспособности рамной крепи путём взрывной разгрузки пород [Текст] / Г. Г. Литвинский, Е. Е. Павлов // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — Алчевск : ДонГТУ, 2009. — Вып. 29. — С. 12–20.
3. Литвинский, Г. Г. Влияние пассивного отпора пород на работоспособность арочной рамной крепи [Текст] / Г. Г. Литвинский, Е. Е. Павлов // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — Алчевск : ДонГТУ, 2010. — Вып. 30. — С. 5–16.
4. Патент 48196 Украина, МПК (2009) E21D 11/00. Способ управления нагружением на рамную крепь горной выработки [Текст] / Г. Г. Литвинский, Е. Е. Павлов ; заявитель и патентообладатель Донбас. гос. техн. ун-т. — № и200909413 ; заявл. 14.09.2009 ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5. — 6 с. : ил.

© Павлов Е.Е.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Леоновым А. А.,
и.о. гл. инженера Филиала «Шахта им. XIX съезда КПСС» Зубковым С. В.**

Статья поступила в редакцию 05.06.18.

к.т.н. Павлов Є. Є. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ВПЛИВ ЩІЛЬНОСТІ ЗАБУТОВКИ ЗАКРІПНОГО ПРОСТОРУ НА ПАСИВНИЙ ОПІР ПОРІД НАВКОЛО ВИРОБОК

Методом кінцевих елементів вивчено закономірності зміни величини і зон пасивного опору рамного кріплення гірничої виробки при різних схемах навантаження в залежності від зміни щільності забутовки закріпного простору.

Ключові слова: підготовка виробки, арочне кріплення, закріпний простір, пасивний опір, коефіцієнт постелі, метод кінцевих елементів.

PhD Pavlov E. E. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

INFLUENCE OF THE CUSHIONING DENSITY OF FIXED SPACE ON THE PASSIVE ROCK BEARING REACTION AROUND WORKINGS

Using the finite element method there have been studied the regularities of value changing as well the passive bearing areas of frame support of underground workings at differ loading schemes dependings on variation of cushioning density of fixing space.

Key words: development workings, arc support, fixed space, passive bearing reaction, coefficient of subgrade reaction, finite element method.

**МЕТАЛЛУРГІЯ
И МАТЕРІАЛОВЕДЕНИЕ**

**МЕТАЛУРГІЯ
ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

**METALLURGY
AND MATERIAL SCIENCES**

УДК 621.771.294

к.т.н. Снитко С. А.,
д.т.н. Сотников А. Л.,
д.т.н. Яковченко А. В.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

СИЛОВЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ФОРМОВОЧНОГО ПРЕССА ПРИ ШТАМПОВКЕ КОЛЁСНЫХ ЗАГОТОВОК

Выполнен анализ влияния схем штамповки колёсных заготовок на силовые режимы работы формовочного пресса применительно к современным прессопрокатным линиям. Показано, что схемы штамповки, которые предусматривают регламентированное распределение металла между центральной и периферийной частями подаваемой в штампы заготовки, характеризуются рациональным силовым режимом формовочного пресса.

Ключевые слова: схема штамповки, колёсная заготовка, силовой режим, формовочный пресс, штампы.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Проблемы модернизации прессопрокатного оборудования [1–3 и др.], совершенствования применяемой технологии в части реализации рациональных силовых режимов работы и высокой стойкости деталей [4, 5], а также повышения качества исходных заготовок и снижения расходного коэффициента [6–10 и др.] являются актуальными научно-техническими задачами металлургической отрасли.

При освоении новой прессопрокатной линии ОАО «Евраз НТМК» специалистами комбината было установлено, что, несмотря на высокое качество исходной заготовки, высокую степень автоматизации и компьютеризации технологического процесса, разработанная фирмой SMS-EUMUCO технология штамповки колёсных заготовок не позволила получить стабильные размеры черновых колёс при использовании исходных заготовок из непрерывнолитого металла собственного производства [10].

Разработка и внедрение на заготовочном прессе силой 50 МН (R5000) технологии осадки заготовок в верхнем плавающем технологическом кольце позволили стабилизировать наружный диаметр заготовок, повысить точность размеров колёсных заготовок на формовочном прессе и снизить брак на прокате [10].

Вместе с тем эта технология не позволяет выполнять разгонку заготовок. Указанная операция является крайне необходимой при производстве многих типоразмеров колёс и в первую очередь при штамповке заготовок колёс диаметром 957 мм с плоскоконическим диском по ГОСТ 10791-2011, доля которых в годовом объёме производства обычно велика.

При штамповке на формовочном прессе силой 90 МН (R9000) заготовок для колёс диаметром 957 мм из осажённой на прессе R5000 заготовки без разгонки («плюшки») имеет место односторонняя схема течения металла из зоны диска в зону обода при повышенной силе штамповки. Причиной является наличие избыточного объёма металла в центральной части заготовки, который преждевременно заполняет формовочные штампы в зоне ступицы.

В работах [11, 12] предложены новые способы штамповки колёсных заготовок, которые позволяют выполнять на прессе R5000 регламентированное распределение металла между центральной и периферийной частями заготовки, обеспечивают их самоцентрировку на формовочном прессе R9000 и получение стабильных размеров колёсных заготовок.

Наряду с получением требуемых параметров по геометрии, макро- и микроструктуре,

а также механических свойств изделий [10–14] одним из важных критериев оценки эффективности применяемых схем деформирования является их влияние на силовой режим прессопрокатного оборудования и стойкость деформирующего инструмента.

В колёсопрокатном производстве повышение указанной стойкости является актуальной задачей, так как именно она во многом определяет затраты, связанные с выбором марки стали для штампов, технологии их изготовления и технологической смазки [13, 14].

Цель работы. Целью настоящей работы являлось изучение влияния схем штамповки колёсных заготовок на силовые режимы работы формовочного пресса R9000.

Изложение материала и его результаты. Анализ формоизменения металла, силовых и температурных параметров при формовке колёсных заготовок на прессе R9000 выполняли на основе результатов конечно-элементного моделирования процесса штамповки в системе DEFORM-3D. При этом решали объёмную задачу для сектора, имеющего угол 90° . Штампы моделировали как недеформируемые объекты. Они были разбиты сеткой и для них, так же как и для заготовки, решали задачу теплопередачи. В качестве материала для штампов использовали имеющуюся в библиотеке DEFORM-3D штамповую сталь AISI-H-13 с соответствующими механическими и теплофизическими характеристиками, зависящими от температуры. Твёрдость материала штампов приняли независимой от температуры, равной 41 HRC.

Для колёсной заготовки использовали пластическую модель материала, кривые течения рассчитали для колёсной стали марки 2 (ГОСТ 10791-2011) [15]. Используемые при моделировании теплофизические свойства колёсной стали взяли из базы данных DEFORM-3D для высокоуглеродистой стали.

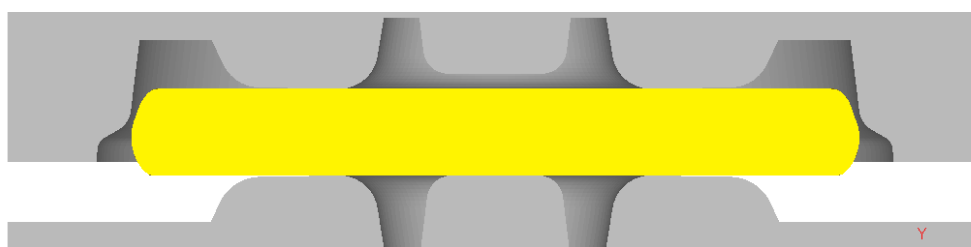
Начальную температуру штампов приняли равной 20°C . Заготовка перед штамповкой имела неравномерное температурное поле в диапазоне $1100\text{--}1260^\circ\text{C}$, полу-

ченное путём конечно-элементного моделирования транспортировки заготовки от нагревательной печи к прессу R5000 (с учётом гидросбива окалины с торцевых поверхностей заготовки), её деформирования на прессе R5000 и транспортировки к прессу R9000. Используемые при моделировании значения скоростей рабочего хода траверс пресса были равны: $0,03\text{ м/с}$ — для пресса R5000, $0,01\text{ м/с}$ — для пресса R9000.

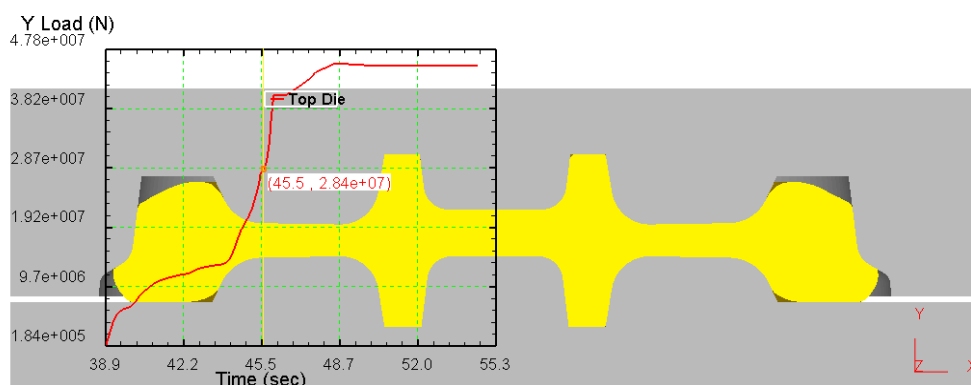
Выполнен анализ трёх схем штамповки колёсной заготовки (рис. 1–3) для колёс диаметром 957 мм с плоскоконическим диском по ГОСТ 10791-2011: А — схема штамповки колёсной заготовки из «плюшки» [10] (используемая на прессопрокатной линии ОАО «Евраз НТМК»); Б — схема штамповки колёсной заготовки [11] из заготовки с предварительно сформованными частями обода и ступицы с нижней стороны, которая предусматривает самоцентрировку заготовки в формовочных штампах (рис. 2, а); В — схема штамповки колёсной заготовки [12], предусматривающая самоцентрировку заготовки в формовочном кольце (рис. 3, а).

Результаты моделирования показали, что при штамповке колёсных заготовок по всем трём схемам температура штампов в последний момент штамповки достигает 400°C .

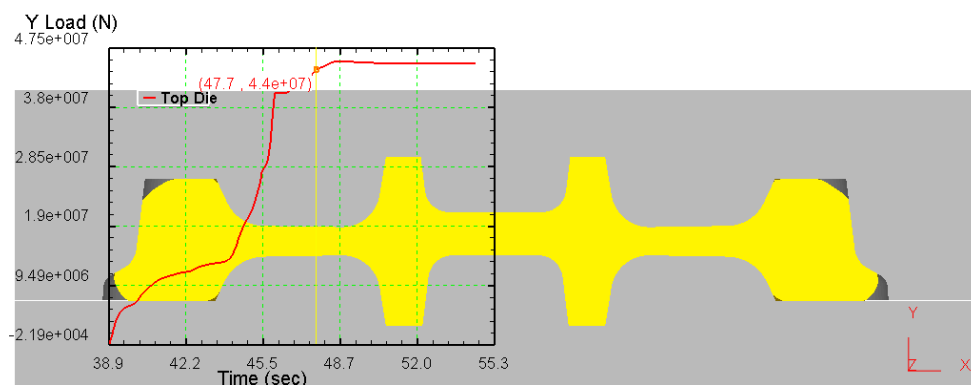
Анализ результатов также показал, что при штамповке колёсной заготовки из «плюшки» штампы в зоне ступицы заполняются задолго до окончания процесса формовки (рис. 1, б). В результате этого имеет место недоштамповка колёсной заготовки на 2,3 мм (рис. 1, в) в связи с тем, что необходимая для продолжения деформирования металла сила даже при работе пресса в режиме выдержки под нагрузкой (рис. 1, г) превышает допустимое значение 90 МН. Кроме этого, доштамповка колёсной заготовки в режиме выдержки максимально развиваемой прессом силы в течение 2–5 с приводит к увеличению длительности контакта деформируемого металла с инструментом и, следовательно, к его дополнительному разогреву.



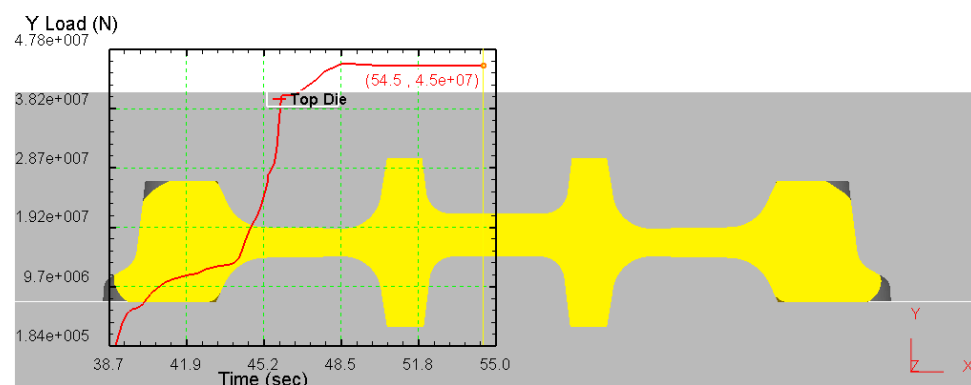
а



б



в



г

Рисунок 1 Штамповка колёсной заготовки по схеме А:

а — первый момент штамповки; б — промежуточный момент штамповки (зазор между штампами 6,5 мм); в — последний момент штамповки (зазор между штампами 2,3 мм); г — штамповка в режиме выдержки под нагрузкой 90 МН (зазор между штампами 1,5 мм)

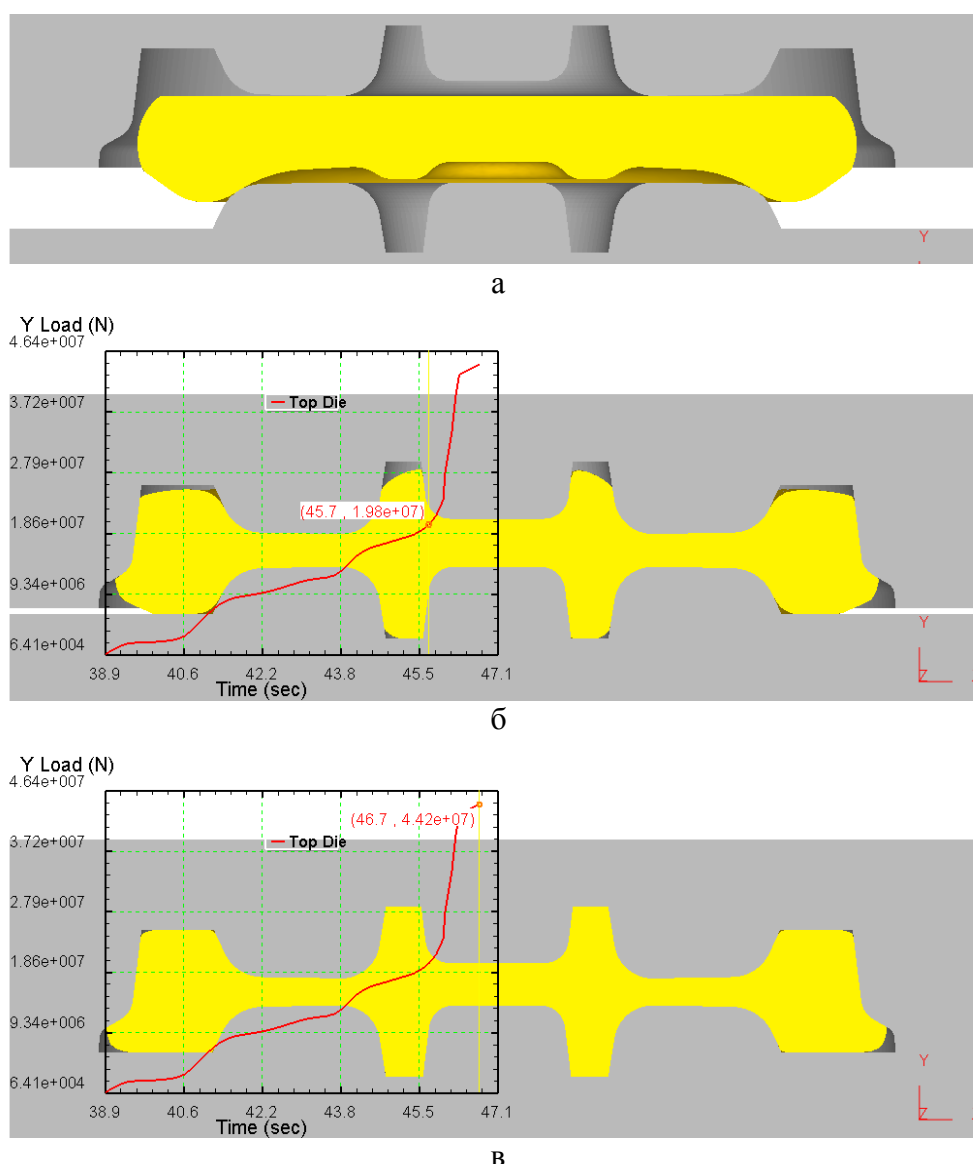


Рисунок 2 Штамповка колёсной заготовки по схеме Б:

а — первый момент штамповки; б — промежуточный момент штамповки (зазор между штампами 6,5 мм); в — последний момент штамповки (зазор между штампами отсутствует)

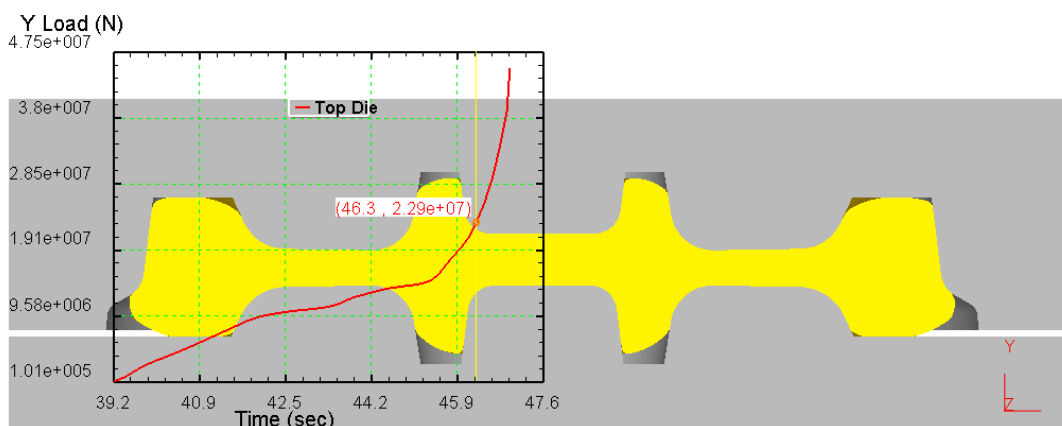
При штамповке колёсных заготовок по схемам Б и В силовой режим работы прессы является рациональным (средняя сила для условий формовки в этом случае составляет 63–70 % от соответствующей средней силы при штамповке из «плюшки») и характеризуется постепенным нарастанием необходимой для реализации процесса формовки силы (см. рис. 2, б и в). Её максимальное значение нужно лишь в последний, кратковременный момент штамповки (рис. 2, в и 3, в). При этом рабо-

та прессы R9000 в режиме выдержки под нагрузкой, как при штамповке по схеме А (рис. 1, г), не требуется.

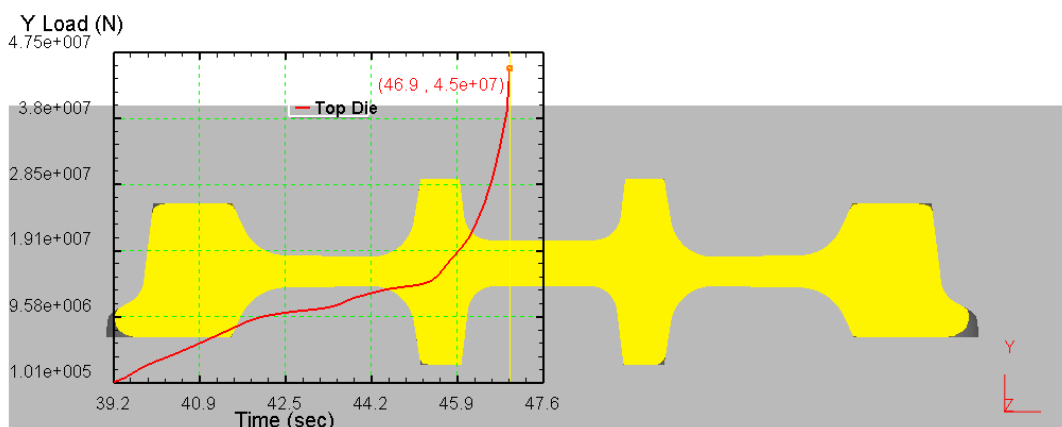
Выводы и направление дальнейших исследований. Таким образом, на основе результатов конечно-элементного моделирования выполнен анализ влияния схем штамповки колёсных заготовок на силовые режимы работы формовочного прессы применительно к современным прессопрокатным линиям.



а



б



в

Рисунок 3 Штамповка колёсной заготовки по схеме В:

а — первый момент штамповки; б — промежуточный момент штамповки (зазор между штампами 6,5 мм); в — последний момент штамповки (зазор между штампами отсутствует)

Показано, что использование схем штамповки, которые предусматривают регламентированное распределение металла между центральной и периферийной частями заготовки, характеризуется рациональным силовым режимом. Во-первых, средняя сила в этом случае составляет 63–70 % от средней силы при штамповке из «плюшки». Во-вторых, в этом случае имеет место посте-

пенное нарастание необходимой для реализации процесса формовки силы, причем её максимальное значение необходимо лишь в последний, кратковременный момент штамповки. При этом работа формовочного прессы в режиме выдержки под нагрузкой не требуется.

Обеспечение стабильности размеров черновых железнодорожных колёс на

прессопрокатных линиях, в составе которых перед колесопрокатным станом установлено только два пресса, возможно на основе схем штамповки колёсных заготовок, представленных на рисунках 2 и 3.

Указанные схемы обеспечивают выполнение операций разгонки заготовок, удержание их асимметрии, а также самоцен-

тровки колёсных заготовок на прессе R9000. Возможность получения осесимметричных колёсных заготовок и черновых колёс, как показали результаты моделирования, позволяет уменьшить массу исходной заготовки (соответствующую номинальным размерам) с 483 до 475 кг.

Библиографический список

1. Kushnarev, A. V. *Modernization of Railroad Wheel Manufacturing Technology at Evraz Ntmk [Text]* / A. V. Kushnarev, A. A. Kirichkov, A. A. Bogatov, S. S. Puzyrev // *Metallurgist*. — 2017. — 60 (9–10). — P. 1080–1086.
2. Снитко, С. А. *Взаимосвязь режимов прокатки с нагрузками и запасом прочности наклонных валков колесопрокатных станов горизонтального и вертикального типов [Текст]* / С. А. Снитко, А. В. Яковченко, А. Л. Сотников // *Вестник Донецкого национального технического университета*. — 2017. — № 3. — С. 14–29.
3. Снитко, С. А. *Совершенствование технологии и оборудования в колесопрокатном производстве [Текст]* / С. А. Снитко, А. В. Яковченко, А. Л. Сотников // *Вестник Донецкого национального технического университета*. — 2017. — № 4. — С. 19–27.
4. Gorbatyuk, S. M. *Method and equipment for mechanically strengthening the surface of rolling-mill rolls [Text]* / S. M. Gorbatyuk, A. V. Kochanov // *Metallurgist*. — 2012. — 56 (3–4). — P. 279–283.
5. Zakharov, A. N. *Modernizing a press for making refractories [Text]* / A. N. Zakharov, S. M. Gorbatyuk, V. G. Borisevich // *Metallurgist*. — 2008. — 52 (7–8). — P. 420–423.
6. Vdovin, K. N. *Technologies for Controlling Flows of Steel and the Development of Refractory Structures for the Tundish of a Four-Strand Continuous Caster [Text]* / K. N. Vdovin, V. V. Tochilkin, V. V. Tochilkin // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2016. — Vol. 57, No. 1. — P. 6–8.
7. Kushnarev, A. V. *Production of high-quality railroad wheels [Text]* / A. V. Kushnarev, A. A. Kirichkov, Y. P. Petrenko, A. A. Bogatov // *Steel in Translation*. — 2010. — Vol. 40, Iss. 3. — P. 268–272.
8. *Introduction of wheel production on a new pressing and rolling line [Text]* / A. V. Kushnarev, V. D. Shestak etc. // *Steel in Translation*. — 2010. — Vol. 40, Iss. 12. — P. 1098–1100.
9. *The ways for lowering in metal consumption upon production of seamless rolled wheels [Text]* / A. V. Yakovchenko etc. // *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*. — 2002. — Iss. 4. — P. 42–44.
10. Кушнарев, А. В. *Разработка научных основ и внедрение современной технологии производства железнодорожных колёс с высокими эксплуатационными характеристиками [Текст]* / А. В. Кушнарев // *Инновационные технологии в металлургии и машиностроении : сб. науч. трудов*. — Екатеринбург : Унив. тип. «Альфа Принт», 2012. — С. 626–637.
11. Снитко, С. А. *Механизм исправления асимметрии при штамповке колёсных заготовок [Текст]* / С. А. Снитко, А. В. Яковченко // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. — Краматорск : ДГМА, 2012. — № 4 (33). — С. 95–99.*
12. Снитко, С. А. *Технологические схемы и механизмы, обеспечивающие повышение точности и стабильности размеров штампованных колёсных заготовок [Текст]* / С. А. Снитко // *Сталь*. — 2013. — № 10. — С. 72–80.
13. *Стойкость штампового инструмента при изготовлении железнодорожных колёс [Текст]* / А. В. Кушнарев и др. // *Производство проката*. — 2015. — № 5. — С. 46–48.
14. *Влияние химического состава и типа поверхностных дефектов на стойкость штампов пресса 10 000 тонн из низколегированных сталей [Текст]* / С. В. Бобырь и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2014. — № 1. — С. 65–69.
15. Snitko, S. *Features Finite-Element Modeling of the Deformation Exact Mass [Text]* / S. Snitko, A. Duzhurzhi // *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. — 2012. — Vol. 9, No. 9. — P. 1505–1510.

© Снитко С. А.
© Сотников А. Л.
© Яковченко А. В.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Еронько С. П.,
к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.*

Статья поступила в редакцию 14.05.18.

**к.т.н. Снітко С. О., д.т.н. Сотников О. Л., д.т.н. Яковченко О. В. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР)
СИЛОВІ РЕЖИМИ РОБОТИ ФОРМУВАЛЬНОГО ПРЕСА ПРИ ШТАМПУВАННІ
КОЛІСНИХ ЗАГОТОВОК**

Виконано аналіз впливу схем штампування колісних заготовок на силові режими роботи формувального преса стосовно до сучасних пресопрокатних ліній. Показано, що схеми штампування, які передбачають регламентований розподіл металу між центральною та периферійною частинами заготовки, що подається до штампів, характеризуються раціональним силовим режимом формувального преса.

Ключові слова: *схема штампування, колісна заготовка, силовий режим, формувальний прес, штамп.*

**PhD Snitko S. A., Doctor of Tech. Sc. Sotnikov A. L., Doctor of Tech. Sc. Yakovchenko A. V.
(DonNTU, Donetsk, DPR)**

POWER OPERATION MODES OF MOLDING PRESS AT WHEEL BLANKS DIE FORMING

Analyzing the influence of wheel blanks die forming schemes on power operating modes of the molding press was done with regard to the modern pressrolling lines. It is shown that the die forming schemes called for regulated metal distribution between central and peripheral blank parts feeding to dies are characterized by rational power mode of molding press.

Key words: *die forming scheme, wheel blanks, power mode, molding press, dies.*

УДК 669.013: 669.054:669.74

к.т.н. Куберский С. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ МАРГАНЦА В ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ РАСПЛАВЫ

Показано влияние химического состава смесей на основе силикомарганцевого шлака на степень извлечения марганца и кремния в металлические расплавы при использовании метода дугового глубинного восстановления. Разработаны технологические рекомендации по оптимизации основности смесей, содержания в них восстановителя, восстанавливаемых и сопутствующих оксидов.

Ключевые слова: оптимизация, химический состав, шлак, силикомарганец, электрическая дуга, восстановление, марганец, кремний, раскисление, легирование, сталь, чугуны.

Развитие теории и технологии дугового глубинного восстановления (ДГВ) полезных элементов в железоуглеродистые расплавы позволило сформулировать основные концептуальные положения нового метода эффективной переработки промышленных отходов и вторичных материалов, способствующего значительному ресурсо- и энергосбережению, а также улучшению экологии и защите окружающей среды [1].

Технология ДГВ была реализована для восстановления магния, кальция, марганца, кремния из магнезита, извести, доломита, марганцевой руды, передельного марганцевого шлака, шлама сухих ферросплавных газоочисток и отвального шлака, производства товарного силикомарганца при десульфурации чугуна и раскислении-легировании металла в ковшах небольшой ёмкости (0,16–1,0 т), характерных для литейных предприятий и металлургических микроразводов.

Наибольший интерес для технологии ДГВ представляют шлаки и шламы, образующиеся на различных этапах производства стали и ферросплавов; относительно бедные по содержанию основного компонента руды, не находящие применения в производстве лигатур; мелкодисперсные фракции сырья, использование которых в производстве ферросплавов ограничено; отработанные огнеупорные материалы, содержащие оксиды легирующих и рафи-

нирующих элементов в количествах, соизмеримых с концентрацией их в промышленно используемых рудах.

В работе [1] подробно рассмотрены особенности извлечения марганца и кремния из шлака от производства силикомарганца. Этот шлак не находит широкого применения в традиционных металлургических технологиях ввиду сложности извлечения из него марганца и кремния, находящихся в виде силикатов. Лишь небольшая часть силикомарганцевого шлака используется при производстве ферросплавов и в дорожном строительстве, а основные его объёмы накапливаются в шлаковых отвалах. Поэтому разработка технологий, способствующих эффективной переработке этого техногенного сырья, является актуальной проблемой для современного состояния отечественного металлургического производства.

Одним из актуальных для переработки силикомарганцевого шлака методом ДГВ вопросов, которые не были изучены в ходе предыдущих исследований, является анализ влияния содержания основных компонентов, входящих в состав рудно-восстановительных смесей (РВС), на эффективность процесса и в первую очередь — степень извлечения полезных компонентов.

Поэтому основной задачей настоящих исследований было определение зависимостей между степенью углетермического дугового глубинного восстановления марганца и

кремния в железоуглеродистый расплав и химическим составом РВС на основе шлака от производства товарного силикомарганца.

Исследования осуществляли в лабораторных условиях в ИСТ-0,06 при обработке 20 плавок чугуна и стали массой 27,5–33,0 кг рудно-восстановительными блоками (РВБ) Ø50 мм. РВС формировали из силикомарганцевого шлака, углеродсодержащего восстановителя (бой графитовых электродов или кокс) и связки (жидкое стекло или каменноугольный пек). Для повышения основности смеси использовали негашёную известь. Содержание оксидов, составляющих основную долю РВС, изменялось в пределах: MnO — 10–25 %, SiO_2 — 25–35 %, CaO — 27–42 %, Al_2O_3 — 1–9 %. Содержание оксидов MgO , FeO , Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O находилось в узких пределах, и при анализе исследуемых параметров их влияние не учитывалось. Количество восстановителя определялось расчётным путём, исходя из стехиометрически необходимого для восстановления всего марганца и кремния, содержащихся в РВС.

Более полному извлечению марганца способствует повышение его активности в РВС [2]. Учитывая тот факт, что в шлаке силикомарганца марганец присутствует в виде силиката, повышение активности его оксида может быть обеспечено связыванием кремнезёма в более прочные соединения. С этой целью было проанализировано влияние основности РВС на степень извлечения марганца. Основность смеси, включающей шлак силикомарганцевого производства с содержанием CaO 15–16 % и SiO_2 45–48 %, изменяли в пределах 0,34–1,6 добавкой в её состав свежееобожжённой извести ($CaO \geq 95$). Максимальная степень извлечения марганца получена при основности 1,4 (рис. 1), которая несколько ниже значений основности, обеспечивающих полную нейтрализацию кремнезёма оксидом кальция ($B=2,0$).

Это объясняется тем, что параллельно с марганцем восстанавливается и кремний, вследствие чего основность смеси всё время повышается и может достигать значе-

ний более 2,0–2,5, поэтому начальной основности рудной смеси 1,4 вполне достаточно для эффективного повышения активности оксида марганца и связывания кремнезёма в более прочные силикаты кальция. Кроме того, ввод дополнительного количества извести в смесь негативно сказывается на тепловом балансе обработки и экономической эффективности процесса, а также снижает долю марганца в РВС, что приводит к большему расходу смеси и увеличению времени обработки.

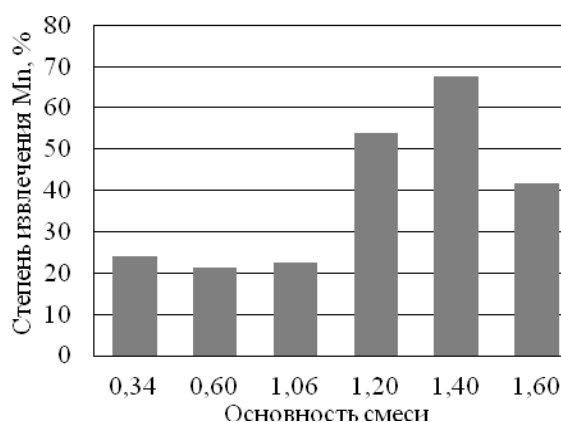


Рисунок 1 Влияние основности РВС на степень извлечения Mn

Результаты исследования влияния содержания различных оксидов в РВС на степень извлечения марганца и кремния представлены на рисунках 2 и 3, а установленные зависимости — в таблице 1.

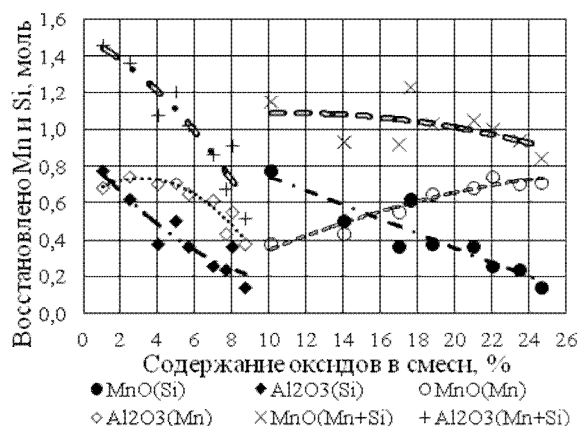


Рисунок 2 Влияние содержания MnO и Al_2O_3 в РВС на извлечение Mn и Si

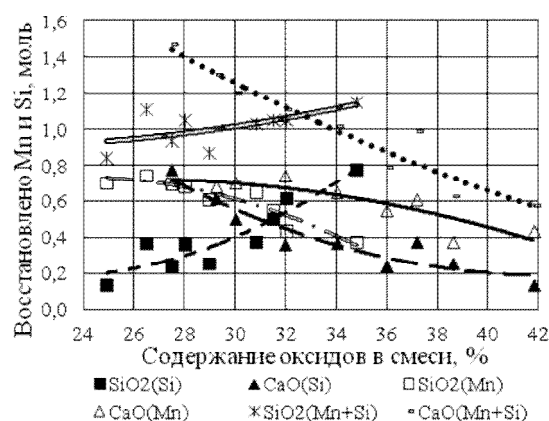


Рисунок 3 Влияние содержания CaO и SiO₂ в PBC на извлечение Mn и Si

При получении ферромарганца в электропечах равновесное содержание MnO в шлаке уменьшается с повышением концентрации CaO, MgO и Al₂O₃. Причём наибольшее влияние оказывает CaO

вследствие образования термодинамически прочных связей с SiO₂ и меньшее — Al₂O₃, так как алюминаты кальция термодинамически менее прочны, чем силикаты кальция и магния [2].

Данные, представленные на рисунках 2 и 3, несколько противоречат выводам работы [2]. Так, для случая марганца степень его извлечения возрастает с ростом содержания MnO в смеси, глинозём лишь до 3–3,5 % способствует некоторому повышению степени извлечения, а с ростом содержания CaO более 32 % и SiO₂ во всём диапазоне исследованных концентраций условия восстановления марганца ухудшаются. Аналогичный характер имеет место и при восстановлении кремния. Суммарное извлечение марганца и кремния в расплав также снижается с увеличением содержания CaO и Al₂O₃ в PBC.

Таблица 1

Зависимости, описывающие связь между химическим составом PBC и степенью извлечения элементов

| Оксид | Степень извлечения, моль | | | | | |
|--------------------------------|------------------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|
| | Si | | Mn | | Si+Mn | |
| | Уравнение регрессии | R ² | Уравнение регрессии | R ² | Уравнение регрессии | R ² |
| MnO | $y = -7E-05x^2 - 0,0361x + 1,1074$ | 0,83 | $y = -0,0009x^2 + 0,0578x - 0,1405$ | 0,93 | $y = -0,001x^2 + 0,0217x + 0,9668$ | 0,27 |
| SiO ₂ | $y = 0,004x^2 - 0,1788x + 2,1912$ | 0,85 | $y = -0,003x^2 + 0,1418x - 0,9351$ | 0,88 | $y = 0,001x^2 - 0,037x + 1,2558$ | 0,37 |
| CaO | $y = 0,0024x^2 - 0,2016x + 4,4682$ | 0,89 | $y = -0,0013x^2 + 0,0694x - 0,1772$ | 0,76 | $y = 0,001x^2 - 0,1322x + 4,2906$ | 0,92 |
| Al ₂ O ₃ | $y = 0,0046x^2 - 0,1154x + 0,8741$ | 0,87 | $y = -0,0106x^2 + 0,066x + 0,6298$ | 0,89 | $y = -0,006x^2 - 0,0494x + 1,5039$ | 0,89 |

Объяснить такое влияние рассмотренных оксидов на степень извлечения марганца и кремния из силикомарганцевого шлака можно в первую очередь бедностью рудного сырья оксидом основного извлекаемого элемента — марганца. Добавка в состав смесей любых примесных оксидов приводит к разбавлению их по содержанию оксида основного восстанавливаемого элемента и будет негативно сказываться на эффективности процесса с точки зрения

количества извлечённых полезных примесей. Ранее проведённые исследования показали, что единственным оксидом, существенно повышающим степень извлечения марганца из силикомарганцевого шлака, является CaO. Однако эффективные его концентрации, а также величина основности смеси имеют определённые границы.

Кроме того, можно предположить, что уменьшение содержания кремнезёма в смеси ниже значений, представленных на ри-

сунке 3, может также повысить степень извлечения марганца, но добиться этого при описанных выше ограничениях в добавке извести можно, лишь используя высокомарганцовистое сырьё (руда, переделный шлак и т. д.), что будет способствовать повышению себестоимости обработки.

Некоторое снижение количества суммарно восстановленных марганца и кремния при увеличении содержания MnO в РВС (рис. 2) можно объяснить тем, что основная цель рассматриваемой технологии — извлечение марганца, и все термодинамические и кинетические параметры процесса в максимальной степени должны обеспечивать эффективную реализацию технологии углестермического извлечения марганца из силикомарганцевого шлака, а кремний восстанавливается попутно. В этих условиях, согласно рисунку 2, значительно снижается количество восстановленного в расплав кремния или может восстанавливаться только один марганец, что обусловлено недостаточной для восстановления кремния начальной температурой обрабатываемого расплава, уменьшением доли свободного SiO_2 , не связанного в силикаты марганца и кальция, а также возможным участием восстановленного кремния в реакциях металлостермического восстановления марганца.

По данным работы [3] на ход процесса восстановления марганца большое влияние оказывают значения параметров C/Mn и $C/(Mn+SiO_2)$ в шихте, которые рекомендуется иметь в пределах 0,38–0,47 и 0,19–0,25 соответственно.

Влияние данных параметров на количество извлечённых в расплав по технологии ДГВ марганца и кремния для проведённых опытных плавов представлено на рисунках 4 и 5, а уравнения установленных зависимостей — в таблице 2.

Как было отмечено выше, количество углеродсодержащего восстановителя вводилось в РВС из расчёта полного восстановления марганца и кремния, находящихся в силикомарганцевом шлаке в виде силикатов. Поэтому абсолютная величина рассматри-

ваемых отношений (0,85–2,05 и 0,38–0,66) в несколько раз превышает значения, рекомендуемые работой [3], где процесс реализован для восстановления предпочтительно одного марганца. Согласно рисунку 4 влияние количества восстановителя в РВС на извлечение марганца и кремния имеет экстремальный характер и оптимальные значения отношения $C/(Mn+SiO_2)$ с точки зрения восстановления марганца составляют 0,5–0,6, а благоприятные условия для совместного извлечения данных элементов наблюдаются при отношении 0,63. При величине отношения C/Mn до 1,45 наблюдается максимальное извлечение марганца, а для одновременного извлечения марганца и кремния это отношение должно находиться в диапазоне 1,45–1,95.

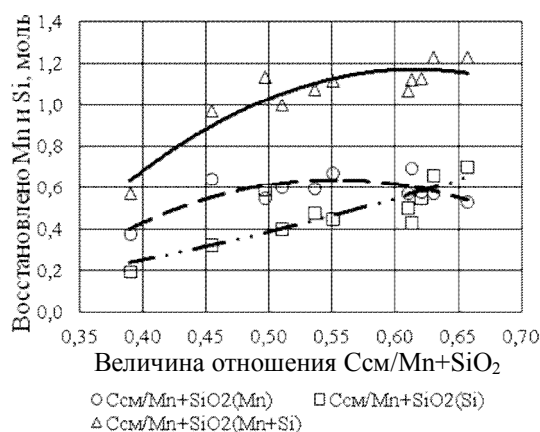


Рисунок 4 Влияние отношения C/Mn в РВС на извлечение Mn и Si

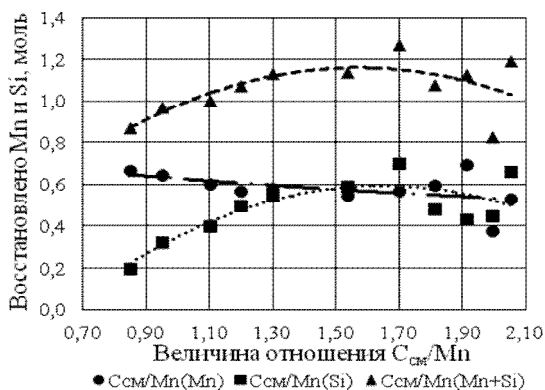


Рисунок 5 Влияние отношения $C/(Mn+SiO_2)$ в РВС на извлечение Mn и Si

Таблица 2

Зависимости, описывающие связь между содержанием углерода в РВС и степенью извлечения элементов

| Степень извлечения, моль | | | | | |
|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| Si | | Mn | | Si+Mn | |
| Уравнение регрессии | R ² | Уравнение регрессии | R ² | Уравнение регрессии | R ² |
| C/(Mn+SiO ₂) | | | | | |
| $y=1,4376x^{1,8891}$ | 0,73 | $y=-8,9665x^2+9,9002x-2,0956$ | 0,64 | $y=-10,553x^2+12,996x-2,829$ | 0,85 |
| C/Mn | | | | | |
| $y=-0,5809x^2+1,9146x-0,9838$ | 0,67 | $y=0,0216x^2-0,1577x+0,7639$ | 0,24 | $y=-0,5593x^2+1,757x-0,2199$ | 0,44 |

Таким образом, в ходе проведённых исследований проанализировано влияние химического состава рудно-восстановительных смесей на базе силикомарганцевого шлака на эффективность дугового глубинного извлечения марганца и кремния в железоуглеродистые расплавы для их раскисления-легирования без использования дорогостоящих ферросплавов и лигатур.

Полученные результаты позволяют утверждать, что для эффективного извлечения марганца из силикомарганцевого шлака в железоуглеродистый расплав необходимо обеспечивать в РВС отношение

$C/(Mn+SiO_2)=0,5-0,6$, C/Mn не более 1,45, максимально возможное количество MnO , содержание глинозёма на уровне 3–3,5 %, CaO — 27–32 % при основности, близкой к 1,4, и минимальном содержании кремнезёма.

Наибольшее количество одновременно извлечённых в расплав марганца и кремния имеет место при отношении $C/(Mn+SiO_2)=0,63$, а $C/Mn=1,45-1,95$.

В ходе последующих исследований предполагается оценить влияние фракционного состава компонентов РВС на степень извлечения элементов методом ДГВ.

Библиографический список

1. Электродуговая и электромагнитная обработка расплавов [Текст] : монография / А. Н. Смирнов и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2013. — 320 с.
2. Гасик, М. И. Марганец [Текст] / М. И. Гасик. — М. : Металлургия, 1992. — 608 с.
3. Гасик, М. И. Физикохимия и технология электроферросплавов [Текст] : учебник для вузов / М. И. Гасик, Н. П. Лякишев. — Днепрпетровск : ГНПП «Системные технологии», 2008. — 453 с.

© Куберский С. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М., зам. нач. ЦЛК филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» ПАО «АМК» Тарасовым В. Н.

Статья поступила в редакцию 21.05.18.

к.т.н. Куберский С. В. (ДонГТУ, м. Алчевск, ЛНР)

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ ДУГОВОГО ГЛИБИННОГО ВИЛУЧЕННЯ МАРГАНЦЮ В ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВІ РОЗПЛАВИ

Показано вплив хімічного складу сумішей на основі силікомарганцевого шлаку на ступінь вилучення марганцю і кремнію в металеві розплави при використанні методу дугового глибинного відновлення. Розроблено технологічні рекомендації щодо оптимізації основності сумішей, вмісту в них відновника, відновлюваних і супутніх оксидів.

Ключові слова: оптимізація, хімічний склад, шлак, силікомарганець, електрична дуга, відновлення, марганець, кремній, розкислення, легування, сталь, чавун.

Ph.D. Kuberskiy S. V. (*DonSTU, Alchevsk, LPR*)

OPTIMIZATION OF REDUCTION MIXTURES COMPOSITION FOR AN ARC DEPTH EXCRETION OF THE MANGANESE INTO IRON-CARBON MELTS

The influence of chemical composition of mixtures based on silicomanganese slag on the degree of manganese and silicon recovery into metal melts is shown using the method of arc depth reduction. Technological recommendations for optimizing the basicity of mixtures, the content of a reducing agent, reducible and associated oxides have been developed.

Keywords: optimization, chemical composition, slag, silicomanganese, electric arc, reduction, manganese, silicon, deoxidation, alloying, steel, cast iron.

УДК 669.18.04:669.89

к.т.н. Куберский С. В.,
к.т.н. Проценко М. Ю.,
Воронько М. И.,
Проценко В. И.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ЭЛЕКТРОДНОЙ СМЕСИ НА ЕЁ УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ

Исследовано влияние химического и фракционного состава электродной смеси, используемой для комбинированного токопроводящего электрода процесса дугового глубинного восстановления, на её удельное электросопротивление.

Ключевые слова: комбинированный электрод, дуговое глубинное восстановление, внепечная обработка, удельное электросопротивление, электродная смесь, известь, шлак силикомарганца, доломитизированный известняк.

Проблема ресурсо- и энергосбережения в настоящее время достаточно актуальна для всех без исключения отраслей промышленности, а также оказывает существенное влияние на экологическую обстановку индустриально развитых регионов.

Особое место в этом вопросе занимает горно-металлургический комплекс и, в частности, сталеплавильное производство. Применение ферросплавов для традиционных схем раскисления и легирования железоуглеродистых сплавов сопряжено с достаточно большими затратами материальных и энергетических ресурсов. Поэтому перспективными являются технологии, в которых предусматривается использование различных промышленных отходов и вторичных сырьевых материалов взамен традиционных компонентов шихты, что позитивно сказывается на себестоимости обработки и её эффективности.

Технология дугового глубинного восстановления (ДГВ) является относительно новым технологическим процессом, позволяющим реализовать восстановление необходимых для внепечной обработки химических элементов непосредственно в железоуглеродистый расплав, минуя стадию получения ферросплавов, а также обеспечить его эффективный нагрев заглублённой электрической дугой, используя при этом различ-

ные техногенные отходы, что способствует ресурсо- и энергосбережению [1].

Основным конструктивным элементом технологии ДГВ является рудно-восстановительный блок, состоящий из комбинированного электрода (КЭ), в который входит электродная смесь (ЭС), и рудно-восстановительной смеси, набиваемой затем вокруг него. КЭ должен обладать максимальной электропроводимостью, чтобы минимизировать долю потерь электроэнергии на омический нагрев и максимальную её долю сконцентрировать в зоне горения дуги, что, в свою очередь, позитивно повлияет на эффективность процесса извлечения полезных элементов в расплав и технологию внепечной обработки в целом [1]. Удельное электросопротивление (ρ) ЭС зависит от множества факторов и в первую очередь от её физико-химических свойств, а также конструктивных особенностей КЭ.

Основная цель работы заключалась в оценке влияния фракционного и химического состава ЭС на её удельное электросопротивление. Поэтому в работе было исследовано влияние крупности и доли различных добавок в составе ЭС на этот физический параметр. В качестве добавок были использованы относительно недорогие и доступные материалы, такие как

шлак от производства силикомарганца (ШМнС), негашёная известь (НИ) и доломитизированный известняк (ДИ).

Выполненные в работе исследования (р) проводили с использованием методики двухфакторного планированного эксперимента с двумя звёздными точками [2]. Экспериментальные образцы изготавливали в соответствии матрицей планированного эксперимента (табл. 1). Содержание ШМнС, НИ и ДИ изменялось от 8,96 % до 16,04 %, а их фракция — от 0,05 мм до 2,5 мм. Рассев графита, полученного от дробления боя графитовых электродов, и связующего (каменноугольный пек) производили через сито с ячейкой 0,63 мм.

Таблица 1

Значения исследуемых в планированном эксперименте параметров

| № | Значения переменных факторов | |
|---|------------------------------|-----------------------------|
| | f (фракция добавки, мм) | Q (количество добавки, %) |
| 1 | 0,40 | 10 |
| 2 | 0,40 | 15 |
| 3 | 2,00 | 10 |
| 4 | 2,00 | 15 |
| 5 | 0,05 | 12,5 |
| 6 | 2,5 | 12,5 |
| 7 | 1,0 | 8,96 |
| 8 | 1,0 | 16,04 |
| 9 | 1,0 | 12,5 |

Для определения (р) ЭС был выбран метод его измерения с помощью индикатора сопротивления МВ (точность $\pm 5,0$ %) по аналогии с исследованиями, проведёнными в работах [3, 4].

Для изготовления образцов все исследуемые добавки сначала были подроблены в металлической ступке и просеяны через сита с ячейками соответствующего размера. ЭС формировали из 80 % графита и 20 % каменноугольного пека, которые имели фракцию «–0,63» мм. Кроме отмеченных компонентов ЭС в неё сверх 100 % добавляли определённое количество балластных добавок, и тщательно перемешивали смесь до получения однородной мас-

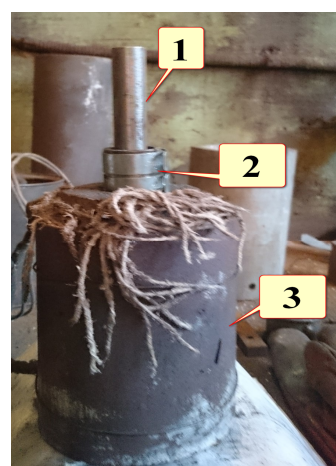
сы. В качестве пресс-формы использовалась разрезанная вдоль оси стальная трубка, которая стягивалась двумя гибкими стальными хомутами (рис. 1).

Пресс-форму устанавливали во внутреннее пространство нагревательной электропечи сопротивления (рис. 2).

Готовая смесь подавалась порциями (5–8 г) в пресс-форму и при достижении температуры 100–120 °С при постоянном усилии уплотнялась стальным прутком. Данная температура соответствует температуре плавления каменноугольного пека и в этих условиях он способен хорошо обволакивать все частицы связываемых материалов.



Рисунок 1 Пресс-форма для набивки образцов

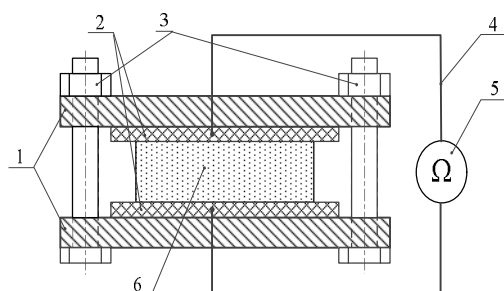


1 — стальной прут; 2 — пресс-форма;
3 — малая шахтная электропечь сопротивления

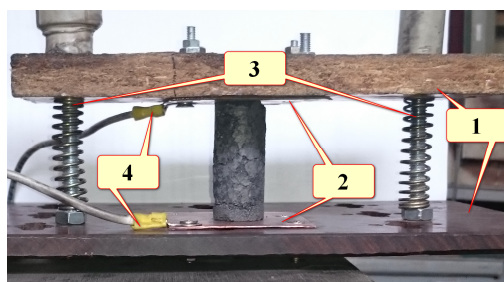
Рисунок 2 Пресс-форма в нагревательной электропечи сопротивления

После того как пресс-форма была полностью набита смесью, она вынималась из печи, и после полного её остывания производилось извлечение опытного образца. Конечное коксование опытных образцов производили с помощью шахтной электропечи СШОЛ-1.1,6/12, в которую помещали специальный стальной стакан с образцами. Внутри стакана опытные образцы засыпались измельчённым коксом для предотвращения их контакта с печной атмосферой. Процесс коксования производили в течение 7–8 ч при температуре 800–900 °С.

При коксовании опытных образцов из электродной смеси удалялись влага и летучие. После завершения коксования образцы извлекали из стального стакана и выполняли зачистку параллельных плоскостей, которые будут соприкасаться с медными пластинами установки для измерения электросопротивления, схема и общий вид которой представлены на рисунке 3 [3, 4].



а)



б)

1 — несущие пластины опытной установки (диэлектрик); 2 — медные пластины; 3 — прижимные болты; 4 — соединительные провода; 5 — омметр марки ММВ; 6 — опытный образец

Рисунок 3 Схема установки для измерения ρ (а) и её общий вид (б)

С целью минимизации погрешности измерений (ρ) для каждого образца исследуемый параметр определяли три раза и рассчитывали среднее значение. Результаты проведенных измерений представлены в таблице 2.

Результаты опытных данных были статистически обработаны с помощью стандартных пакетов программ Microsoft Excel и Statistica 64 Version 10. Полученные зависимости представлены в таблице 3 и на рисунке 4.

Таблица 2

Результаты измерения электросопротивления электродной смеси с различными добавками

| № | Величина удельного электросопротивления образца (ρ), (Ом·м)·10 ⁻⁴ | | |
|---|--|-------|--------|
| | ШМнС | ДИ | НИ |
| 1 | 6,779 | 9,623 | 11,870 |
| 2 | 6,459 | 9,073 | 9,884 |
| 3 | 12,331 | 7,119 | 9,073 |
| 4 | 6,321 | 6,059 | 14,029 |
| 5 | 6,637 | 5,941 | 12,994 |
| 6 | 5,610 | 5,505 | 8,981 |
| 7 | 4,565 | 5,531 | 8,302 |
| 8 | 5,007 | 6,598 | 12,322 |
| 9 | 4,704 | 6,392 | 10,145 |

Таблица 3

Уравнения регрессии, описывающие связь между (ρ) ЭС и её составом

| Добавка* | Уравнение регрессии |
|----------|---|
| 1 | $\rho = 6,6603 + 8,281 \cdot f - 0,6476 \cdot Q + 0,9336 \cdot f^2 - 0,7951 \cdot f \cdot Q + 0,0495 \cdot Q^2$ |
| 2 | $\rho = 13,3905 - 0,0676 \cdot f - 1,0106 \cdot Q + 0,2424 \cdot f^2 - 0,1091 \cdot f \cdot Q + 0,045 \cdot Q^2$ |
| 3 | $\rho = 18,8619 - 11,9045 \cdot f - 0,6502 \cdot Q + 0,504 \cdot f^2 + 0,8004 \cdot f \cdot Q + 0,0081 \cdot Q^2$ |

*1 — ШМнС; 2 — ДИ; 3 — НИ

Для удобства анализа представленных на рисунке 4 данных были построены парные зависимости исследуемых параметров при постоянном значении третьего (рис. 5). На рисунке 5,а показано влияние крупности и доли ШМнС в ЭС. Анализ рисунка 5,а показывает, что при уве-

личении содержания добавки в ЭС с 7 % до 17 % для фракций «-1,0»÷«-2,6» (ρ) снижается с $8,0 \div 18,0 \cdot 10^{-4}$ Ом·м до $2,7 \div 5,7 \cdot 10^{-4}$ Ом·м. Для фракции «-0,6» при увеличении содержания добавки до 13 % (ρ) незначительно снижается, а при большем количестве добавки начинает расти.

Однако изменение (ρ) для этой фракции во всём исследованном диапазоне находится в достаточно узких пределах ($6,5 \div 7,2 \cdot 10^{-4}$ Ом·м), т. е. повышается всего на $0,7 \cdot 10^{-4}$ Ом·м, что не превышает 10 %.

При использовании добавки ШМнС фракцией «-0,2» отмечается повышение (ρ) от $5,2 \cdot 10^{-4}$ Ом·м при 7 % добавки

до $9,0 \cdot 10^{-4}$ Ом·м при 17 % её содержания, т. е. в 1,7 раза.

Влияние на исследуемый параметр добавки ДИ в ЭС представлено на рисунке 5,б и свидетельствует о том, что величина (ρ) для всех значений крупности добавки снижается при повышении её доли в ЭС до 12,5÷14,5 % и принимает минимальные значения для фракций «-0,2» и «-0,6» при доле добавки в ЭС 12,5 %, для фракций «-1,0» и «-1,4» при доле добавки в ЭС 13,5 %, для фракций «-1,8»÷«-2,6» при доле добавки в ЭС 14,5 %, а превышение отмеченных концентраций в этих диапазонах крупности ДИ приводит к повышению (ρ).

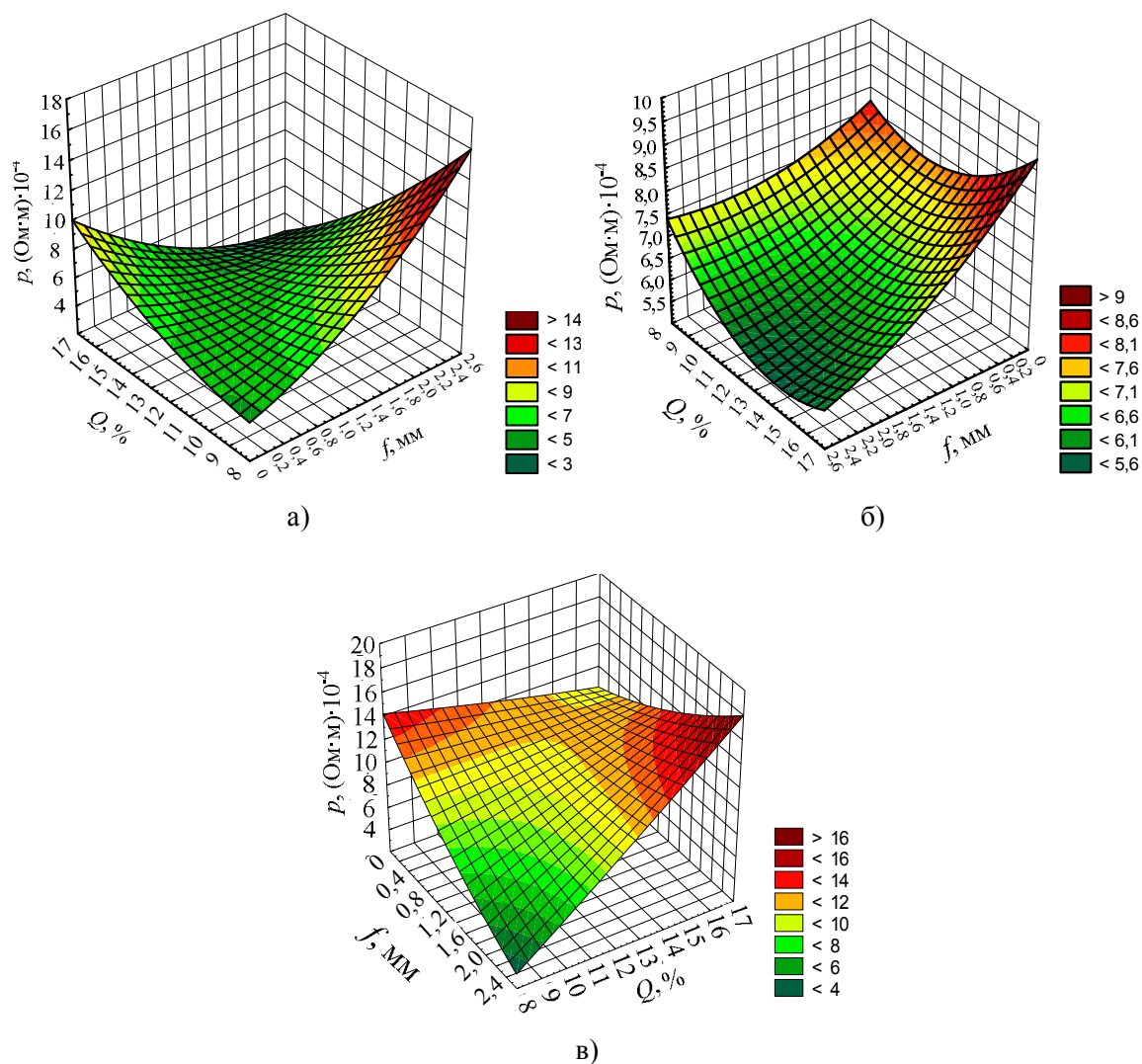


Рисунок 4 Зависимости (ρ) ЭС от фракционного состава и количества добавок:

а — ШМнС; б — ДИ; в — НИ

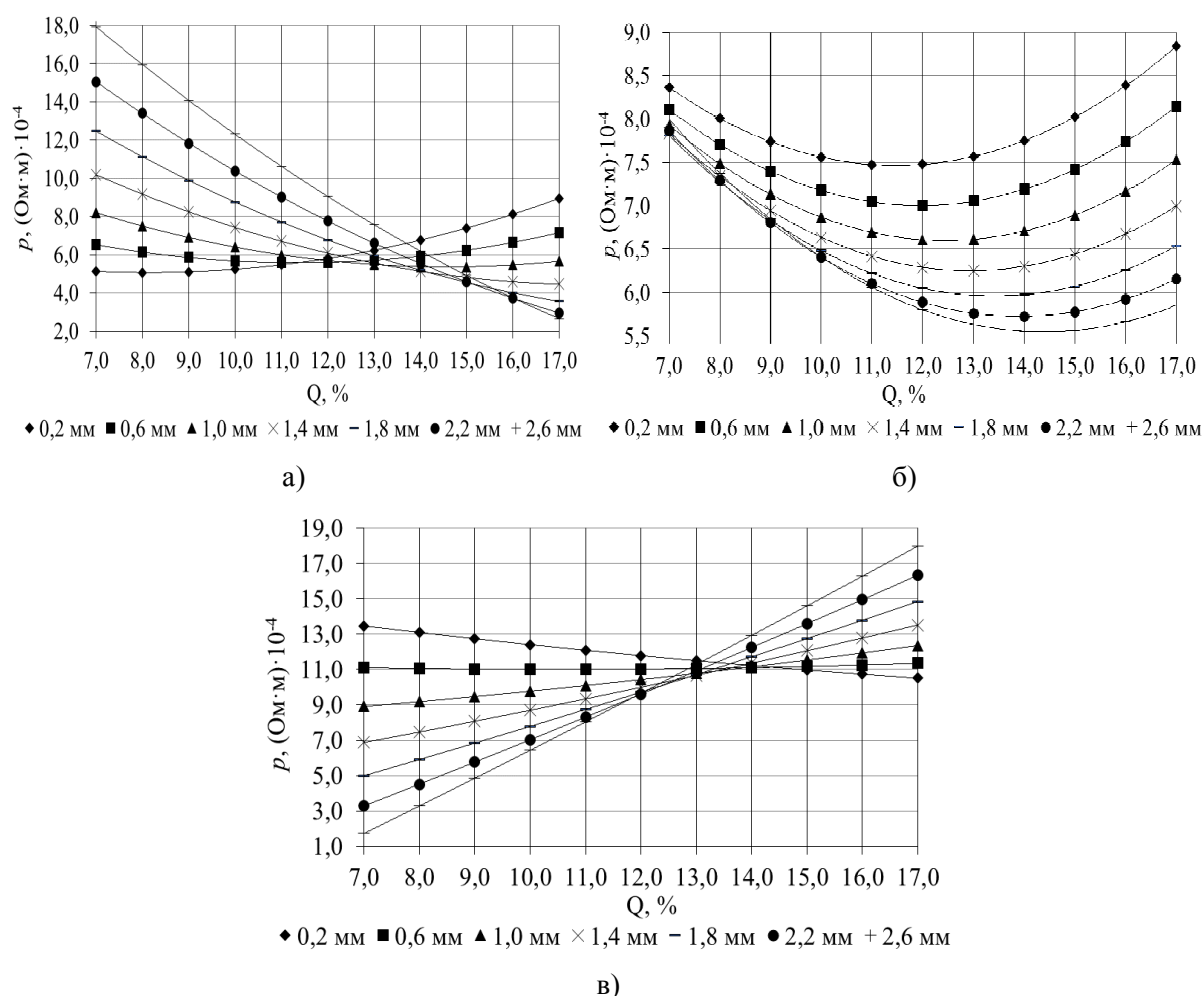


Рисунок 5 Влияние фракции и количества добавки в ЭС на (ρ) :
а — ШМнС; б — ДИ; в — НИ

На рисунке 5,в показано влияние на (ρ) крупности и доли НИ в составе ЭС. Представленные на рисунке 5,в данные свидетельствуют о том, что для фракций НИ « $-1,0$ »÷« $-2,6$ » (ρ) увеличивается с $1,7 \div 8,9 \cdot 10^{-4}$ Ом·м при доле добавки 7 % до $12,4 \div 18,0 \cdot 10^{-4}$ Ом·м при 17 % НИ в ЭС, что является негативным фактором.

Добавка НИ фракцией « $-0,6$ » в ЭС практически не влияет на (ρ) , а при использовании фракции « $-0,2$ » исследуемый параметр уменьшается с $13,5 \cdot 10^{-4}$ Ом·м при 7 % добавки до $10,5 \cdot 10^{-4}$ Ом·м при её содержании 17 %, что составляет около 29 %.

На основании проведённых исследований можно утверждать, что низкие

значения (ρ) обеспечиваются добавкой в состав ЭС 13–14 % ШМнС и 12–12,5 % ДИ фракций « $-0,2$ » и « $-0,6$ ». Кроме того, низкие значения обеспечиваются добавкой в состав ЭС 13–14 % ДИ и более 14 % НИ фракций « $-1,8$ »÷« $-2,6$ ». Однако такая крупность добавки непригодна для набивки КЭ, так как уплотняемая ЭС будет иметь высокую пористость и возможно её высыпание в процессе горения электрода.

В ходе дальнейших исследований предполагается проанализировать влияние рассмотренных добавок в ЭС на скорость расходования КЭ и энергетические параметры процесса.

Библиографический список

1. Электродуговая и электромагнитная обработка расплавов [Текст] : монография / А. Н. Смирнов и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2013. — 320 с.
2. Воронько, М. И. Разработка методики для оценки влияния состава электродной смеси на её электропроводность [Текст] / М. И. Воронько, В. О. Десятников, М. Ю. Проценко // *Металлургия XXI столетия глазами молодых [Электронный ресурс] : материалы IV Международной научно-практической конференции молодых учёных и студентов.* — Донецк : ГОУ ВПО «ДНТУ», 2018. — С. 39–42. — (CD-ROM).
3. Галяпа, А. Г. Исследование электросопротивления рудно-восстановительной смеси для дугового глубинного восстановления элементов [Текст] / А. Г. Галяпа, М. Ю. Проценко // *Тезисы доклада на XII научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «АМК».* — Алчевск : ОАО «АМК», 2012. — С. 15–16.
4. Чернобровин, В. П. Электропроводность хромоугольных брикетов и их компонентов для производства феррохрома [Текст] / В. П. Чернобровин, В. Б. Шмыга, Р. А. Хидиятов, Г. Г. Михайлов, И. Ю. Пашикев, А. В. Сенин // *Вестник ЮУрГУ.* — Челябинск : Металлургия, 2005. — № 3, Вып. 5. — С. 66–69.

© Куберский С. В.
 © Проценко М. Ю.
 © Воронько М. И.
 © Проценко В. И.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.,
 зам. нач. ЦЛК филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» Тарасовым В. Н.*

Статья поступила в редакцию 04.06.18.

к.т.н. Куберский С. В., к.т.н. Проценко М. Ю., Воронько М. И., Проценко В. И. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДУ ЕЛЕКТРОДНОЇ СУМІШІ НА ЇЇ ПИТОМИЙ ЕЛЕКТРООПІР

Досліджено вплив хімічного і фракційного складу електродної суміші, що використовується для комбінованого струмопровідного електроду процесу дугового глибинного відновлення, на її питомий електроопір.

Ключові слова: комбінований електрод, дугове глибинне відновлення, позапічна обробка, питомий електроопір, електродна суміш, вапно, шлак силікомарганцю, доломітизований вапняк.

Ph.D. Kuberskiy S. V., Ph.D. Protsenko M. Yu., Voron'ko M. I., Protsenko V. I. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

INVESTIGATING THE EFFECT OF ELECTRODE MIXTURE COMPOSITION ON ITS SPECIFIC ELECTRICAL RESISTANCE

The influence of the chemical and fractional composition of the electrode mixture used for the combined conductive electrode of the arc depth reduction process on its electrical resistivity is studied.

Key words: combined electrode, arc depth reduction, out-of-furnace treatment, resistivity, electrode mixture, lime, silicomanganese slag, dolomitized limestone.

УДК 669.1

к.т.н., проф. Давиденко В. А.,
Лисовая А. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ ПАО «АМК», НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИТОМЕЛИОРАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Приведены результаты определения количественных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (ПАО «АМК») при помощи существующей методики расчёта выбросов вредных и токсичных веществ в атмосферу для предприятий чёрной металлургии.

Ключевые слова: загрязнение атмосферного воздуха, вредные выбросы, методика, валовые выбросы, пыль, фитомелиорация.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. В настоящее время одной из острых проблем Донбасса является загрязнение атмосферного воздуха выбросами вредных веществ. Особенно актуальной она является для промышленных городов, таких как г. Алчевск, который является одним из крупнейших промышленных центров региона.

Основным загрязнителем атмосферного воздуха является ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (ПАО «АМК») — третий по производству металлопродукции в Донбассе. Уровень концентраций вредных и токсичных веществ в атмосфере металлургических городов является чрезвычайно высоким, что отрицательно влияет на здоровье населения.

В нашем регионе в настоящее время около 80 % предприятий оснащено пылегазоулавливающими установками. Устаревшие пылеочистные сооружения в основном реконструированы, что позволяет повысить уровень пылеочистки. Для разработки способов очистки технологических газов от NO, CO, а также повышения эффективности очистки от пыли и SO₂ необходимо иметь информацию о выбросах этих веществ в атмосферу при работе технологических агрегатов [1].

В результате развития чёрной металлургии за последние два десятилетия ряд

технологических процессов был усовершенствован: например, был значительно интенсифицирован процесс выплавки чугуна и стали, а также повышены единичные производительности агрегатов [1].

Постановка задачи. Определить количественные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу ПАО «АМК» для использования в последующем фитомелиоративных методов высадки зелёных насаждений (деревья, кустарники, травы), которые в комплексе с применяемыми техническими средствами пылегазоочистки позволят нормализовать положение в атмосфере территорий, прилегающих к промышленным площадкам металлургических комбинатов.

Изложение материала и его результаты. На долю предприятий чёрной металлургии приходится 15–20 % общих загрязнений атмосферы промышленностью. При выплавке одной тонны стали в атмосферу выбрасывается 0,04 т твёрдых частиц, 0,03 т оксидов серы и до 0,05 т оксида углерода, а также в небольших количествах такие опасные загрязнители, как марганец, свинец, фосфор, мышьяк, пары ртути и др. В процессе сталеплавленного производства в атмосферу выбрасываются парогазовые смеси, состоящие из фенола, формальдегида, бензола, аммиака и других токсичных веществ.

Процессы выплавки чугуна и переработки его на сталь также сопровождаются выбросом в атмосферу различных газов. Выброс пыли в расчёте на 1 т переделного чугуна составляет 4,5 кг, сернистого газа — 2,7 кг и марганца — 0,5–0,1 кг. Вместе с доменным газом в атмосферу в небольших количествах выбрасываются также соединения мышьяка, фосфора, сурьмы, свинца, пары ртути и редких металлов, цианистый водород и смолистые вещества. Главная особенность конвертерного процесса — получение стали из жидкого чугуна без применения топлива. Образующиеся дымовые газы состоят из частиц оксидов кремния, марганца и фосфора. В дыме содержится значительное количество оксида углерода (до 80 %). Концентрация пыли в отходящих газах — примерно 15 г/м³.

На аглофабриках источниками загрязнения воздуха являются аглоленты, барабанные и чашевые охладители агломерата, обжиговые печи, узлы пересыпки и сортировки агломерата и других компонентов шихты. В состав газов входят оксиды серы и углерода, а пыль содержит железо и его оксиды, оксиды марганца, магния, фосфора, кремния, кальция, иногда частицы титана, меди, свинца.

Характер загрязнения атмосферы предприятиями металлургического комплекса связан с объёмом производства, уровнем применяемых технологий, изношенностью оборудования, эффективностью применяемых природоохранных мероприятий, количественными и качественными характеристиками выбросов, географическим положением, ландшафтными особенностями местности и др. В городах с металлургическими предприятиями наиболее вредными и токсичными веществами являются: пыль, диоксид азота, диоксид серы, оксид углерода, фенол, сероводород и др.

В настоящее время для установления количественных параметров образующихся и выделяющихся выбросов вредных веществ в атмосферу используют укрупнённые показатели использованного сырья и готовой продукции. В соответствии с

этим, расчёты показателей производятся отдельно по каждому переделу металлургического комплекса с учётом степени изношенности как технологического оборудования, так и средств пылегазоочистки.

В настоящее время существует большое количество методик по определению выбросов вредных веществ в атмосферу, которые основаны на конкретных данных металлургических заводов определённых регионов и использующих определённую сырьевую продукцию. Поэтому для повышения достоверности данных предпочтительнее применять методики или значения удельных выбросов вредных веществ, предназначенные для регионов, использующих аналогичные технологическое оборудование и сырьё.

Методика расчёта выбросов вредных веществ в атмосферу для предприятий чёрной металлургии (далее — Методика) распространяется на организованные и неорганизованные источники выбросов от технологического оборудования. Методика составлена в соответствии с ГОСТ 17.2.3.02-78 «Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями» и определяет единый порядок и обязанности организаций, участвующих в работах по прогнозу загрязнения атмосферы, регулированию выбросов и контролю эффективности этих работ [1].

Согласно данной Методике, валовый выброс загрязняющих веществ в тоннах в год ($Q_{год}$) определяется по формуле (1):

$$Q_{год} = 10^3 * q * P * T * (1 - n), \quad (1)$$

где q — удельное выделение вещества на единицу продукции, кг/т;

P — расчётная производительность технологического оборудования, т/ч;

T — годовой фонд рабочего времени, час;

n — степень очистки загрязняющих веществ, в долях от единицы.

Данные расчётов приведены в таблице 1.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Из данных таблицы 1 следует, что за 2013 год наибольший объём валовых выбросов после очистки приходится на конвертерный цех ПАО «АМК».

После 2013 г. полных и достоверных данных по ПАО «АМК» не имеется в связи с военными действиями и отсутствием информационных материалов в открытой печати.

Основными загрязняющими веществами ПАО «АМК» являются: пыль, СО (оксид углерода), SO₂ (диоксид серы), NO_x (оксиды азота). Они составляют 77 % от всех выбросов. Согласно вышеуказан-

ным расчётам по Методике определяем количество основных загрязняющих веществ. Для определения используются показатели удельных выбросов. Результаты расчётов приведены в таблице 2.

Согласно проведённым ранее исследованиям, концентрация выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух сокращается при осаждении на земную поверхность в 2–4 раза (для расчётов берём максимальное значение) [3].

Данные, полученные в результате проведённых вычислений, приведены в таблице 3.

Таблица 1

Валовые объёмы выбросов ПАО «АМК» от основных переделов

| Основные переделы ПАО «АМК» | Валовый объём выбросов ПАО «АМК», тыс. т/год (2013 год) | |
|--------------------------------|--|---------------|
| | до очистки | после очистки |
| Агломерационный | 2,995 | 0,288 |
| Доменный | 76,310 | 18,314 |
| Конвертерный | 299,771 | 71,945 |
| ВСЕГО | 379,076 | 90,547 |

Таблица 2

Главные загрязнители ПАО «АМК» от основных переделов

| Основные переделы ПАО «АМК» | Главные загрязняющие вещества, тыс. тонн | | | |
|--------------------------------|--|----------------|-----------------|-----------------|
| | Пыль | СО | SO ₂ | NO _x |
| Агломерационный | 112,222 | 13,69 | 2,31 | 272,12 |
| Доменный | 24,4 | 867,61 | 5,24 | - |
| Конвертерный | 24911,09 | 1548,24 | 10610,37 | - |
| ВСЕГО | 25047,712 | 2429,54 | 10617,92 | 272,12 |

Таблица 3

Сокращение выбросов загрязняющих веществ при осаждении на земную поверхность

| Основные загрязняющие вещества, тыс. тонн | | | |
|---|---------|-----------------|-----------------|
| Пыль | СО | SO ₂ | NO _x |
| 6261,928 | 607,385 | 884,826 | 68,03 |

Выводы и направление дальнейших исследований.

Таким образом, необходимо провести подбор деревьев и кустарников для наиболее эффективного улавливания пыли, диоксида серы (SO₂), оксида углерода (СО) и

окислов азота (NO_x). Насаждения, используемые для озеленения, должны быть эффективными в экологическом отношении и достаточно устойчивы к загрязнению атмосферы промышленными выбросами (средняя относительная устойчивость к газопы-

левым выбросам должна составлять не менее 3,5 баллов при пятибалльной системе). В случае если устойчивость менее 3 баллов, произойдёт деградация зелёных насаждений с последующей их гибелью; аналогичная ситуация будет прослеживаться и в том случае, если остаточные выбросы окажутся такими, которые вредно воздействуют на зелёные насаждения даже при их устойчивости выше 3,5 баллов.

Предполагается идея борьбы с выбросами вредных и токсичных веществ с помощью технических и фитомелиоративных средств. Для этого необходимы достоверные данные по валовым загрязнениям, образующимся в процессе выполнения технологических операций на промышленных предприятиях (исходные первичные данные). Затем необходимо чётко определить остаточные количества после применения пылегазоочистных мероприятий, сооружений, установок, остаточные количественные параметры загрязнений, т. е. определить выбросы вредных и токсичных веществ непосредственно в атмосферный воздух.

При определённых значениях остаточных количественных параметров выбросов

вредных веществ в атмосферу, когда ещё фиксируются превышения предельно допустимых концентраций по отдельным загрязняющим веществам, возможно внедрение зелёных насаждений в соответствии с установленными требованиями фитомелиорации, посредством чего будет нормализовано состояние атмосферы как в пределах границ санитарно-защитной зоны (СЗЗ), так и в селитебных зонах, прилегающих к СЗЗ.

При этом возможен и второй вариант, при котором по-прежнему в атмосферном воздухе будут фиксироваться превышения предельно допустимых концентраций по некоторым отдельным вредным веществам. В этом случае необходимо повысить эффективность пылегазоочистных мероприятий, сооружений, установок до уровня, при котором деревья будут полноценно выполнять свою функцию по снижению количества вредных загрязнений в воздухе.

Для достижения поставленной цели также возможно снижение объёма выпускаемой продукции, в результате чего, естественно, будут снижены исходные первичные количественные параметры.

Библиографический список

1. Пылегазовые выбросы предприятий чёрной металлургии [Текст] / С. М. Андоньев, Ю. С. Зайцев, О. В. Филиппов ; под общ. ред. О. В. Филиппова. — [3-е изд., испр. и доп.]. — Харьков, 1998. — 247 с.
2. Сборник методик по расчёту выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами [Текст] / Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды. — Л. : Гидрометеиздат, 1986. — 142 с.
3. Стольберг, Ф. В. Экология города [Текст] : учебник / Ф. В. Стольберг. — К. : Либра, 2000. — 464 с.

© Давиденко В. А.

© Лисовая А. А.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МЧМ ДонГТУ Куберским С. В.,
директором ООО «ЭКОТЕСТ» Полевой Л. М.**

Статья поступила в редакцию 08.06.18.

к.т.н., проф. Давиденко В. А., Лісова А. О. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

**ВИЗНАЧЕННЯ ВИКИДІВ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРУ ПАТ «АМК»,
НЕОБХІДНИХ ДЛЯ ВСТАНОВЛЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ
ФІТОМЕЛІОРАЦІЙНИХ ЗАХОДІВ**

Наведено результати визначення кількісних викидів забруднюючих речовин в атмосферу ПАТ «Алчевський металургійний комбінат» (ПАТ «АМК») за допомогою існуючої методики розрахунку викидів шкідливих і токсичних речовин в атмосферу для підприємств чорної металургії.

Ключові слова: забруднення атмосферного повітря, шкідливі викиди, методика, валові викиди, пил, фітомеліорація.

PhD Davidenko V. A., Lisovaia A. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

**DETERMINING THE LEVEL OF HAZARDOUS EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE
BY PJSC «ALCHEVSK IRON-AND-STEEL WORKS» FOR ASCERTAINMENT
THE NECESSITY OF FITOMELIORATION MEASURES**

There has been given the results of quantitative hazardous emissions into the atmosphere by PJSC «Alchevsk Iron-and-Steel Works» using the existing calculation method of hazardous and toxic emissions into the atmosphere for iron-and-steel works.

Key words: air pollution, hazardous emissions, method, gross emission, dust, fitomelioration.

**СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**

**БУДІВНИЦТВО
І АРХІТЕКТУРА**

**CIVIL ENGINEERING
AND ARCHITECTURE**

УДК 504.05

д.т.н. Дрозд Г. Я.

(ИСА и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, drozd.g@mail.ru)

ПОТЕНЦИАЛ РАЗВИТИЯ СЕКТОРА ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ НА ЛУГАНЩИНЕ

Рассмотрена проблема утилизации твёрдых бытовых и промышленных отходов в промышленном регионе Донбасса. В результате обобщения зарубежного опыта в сфере обращения с отходами и сопоставления с существующими региональными условиями обоснована необходимость и возможность создания специальной отрасли — сектора обращения с отходами. Показана потенциальная его эффективность как в экологическом, так и в экономическом аспектах: в сфере бытовых отходов только 30 % их объёма подлежит захоронению, а оставшаяся часть перерабатывается или в виде вторичных ресурсов стоимостью до 1 млрд рублей возвращается в хозяйственный оборот. В сфере промышленных отходов показана возможность создания шлакощелочной строительной индустрии, основанной исключительно на местных промышленных отходах для производства строительной продукции стоимостью десятки миллиардов рублей.

Ключевые слова: твёрдые бытовые и промышленные отходы, утилизация, экологическая безопасность, вторичное сырьё.

Одной из острейших проблем современности являются отходы. Сегодня она как никогда актуальна для возрождающихся в условиях войны самопровозглашённых республик Донбасса — ЛНР и ДНР. На данный момент на территории ЛНР площадью 8350 км² находится более 1,5 млрд т промышленных отходов, миллионы тонн привнесённых войной разрушений с ежегодным пополнением сотен тысяч тонн твёрдых бытовых отходов от 1,5-миллионного населения. Нагрузка по отходам достигает 110 тыс. т/км² (рис. 1).

Твёрдые бытовые отходы (ТБО) размещены в республике на 10 свалках, относящихся к районным центрам и городам, а также на более чем 60 свалках в сёлах и занимают общую площадь более 150 га. Самая большая свалка Луганщины — Луганский полигон ТБО — занимает особое место в теме экологии региона, т. к. эксплуатируется более 40 лет, что вдвое превышает нормативные сроки. Перед самой войной полигон был рекультивирован, оборудован системой сбора и утилизации свалочного газа, но... В результате боевых действий 2014–2015 гг. был разрушен и сейчас по необходимости вынужден принимать на захоронение образующиеся ТБО в виду отсутст-

вия иных мест захоронения. Сложившаяся в регионе экологическая ситуация обусловила незамедлительный поиск цивилизованного и эффективного решения проблемы отходов.

Цель работы — на основе анализа накопленного международного опыта в сфере обращения с отходами обосновать необходимость и эффективность создания специальной отрасли — сектора управления и обращения с отходами, — призванной повысить экологические, экономические и социальные аспекты региона.

Обзор и обсуждение зарубежного опыта обращения с отходами. Европейская система обращения с отходами прошла долгий путь. Её развитие можно представить в виде пяти этапов вертикального движения по лестнице Лансинка (рис. 2, а) от самого примитивного — захоронения отходов — до наиболее приоритетного — предотвращения их образования [10].

Промежуточные этапы характеризуются совершенствованием экологически безопасной системы обращения с отходами наряду с усложнением технологий и совершенствованием нормативно-правовой базы, а также с увязкой их эффективности и экономичности. К 2010 году уровень перера-

ботки отходов в странах ЕС заметно различался от незначительного до почти 100 % переработки (рис. 2, б), что связано как с различными стартовыми условиями и уровнем развития этих стран, так и с национальными требованиями к организации системы обращения с отходами.

Для достижения высокого, в сравнении с Украиной, уровня развития системы обращения с отходами Европе понадобилось около 40 лет. Эволюционный путь развития системы управления отходами на примере передовых стран Европы обобщён в таблице 1.

Как следует из таблицы, каждый этап обращения с отходами занимает примерно 5–7 лет. При этом в общем потоке отходов доля их захоронения сокращается, а доля переработки во вторичное сырьё или полезный продукт возрастает.

Примеряя на себя опыт стран с различным стажем в ЕС, можно утверждать, что на эво-

люционном пути возможно за довольно короткий срок совершить скачок в уровне развития системы обращения с отходами.

Для этого необходимо в первую очередь создать сектор обращения с отходами, координирующий организации, осуществляющие сбор и вывоз мусора, с организациями по его переработке и рынок отходов с присущим ему финансово-экономическим, организационно-административным и информационно-культурным обеспечением эффективного управления обращения ТБО [9].

Образование в регионе сектора обращения с отходами позволит решить ряд важнейших задач: улучшить экологическую ситуацию (что следует из снижения объёмов отходов), создать целую отрасль с предприятиями и новыми рабочими местами и дать толчок развитию экономики региона. Подтверждением таких ожиданий служит опыт других стран.

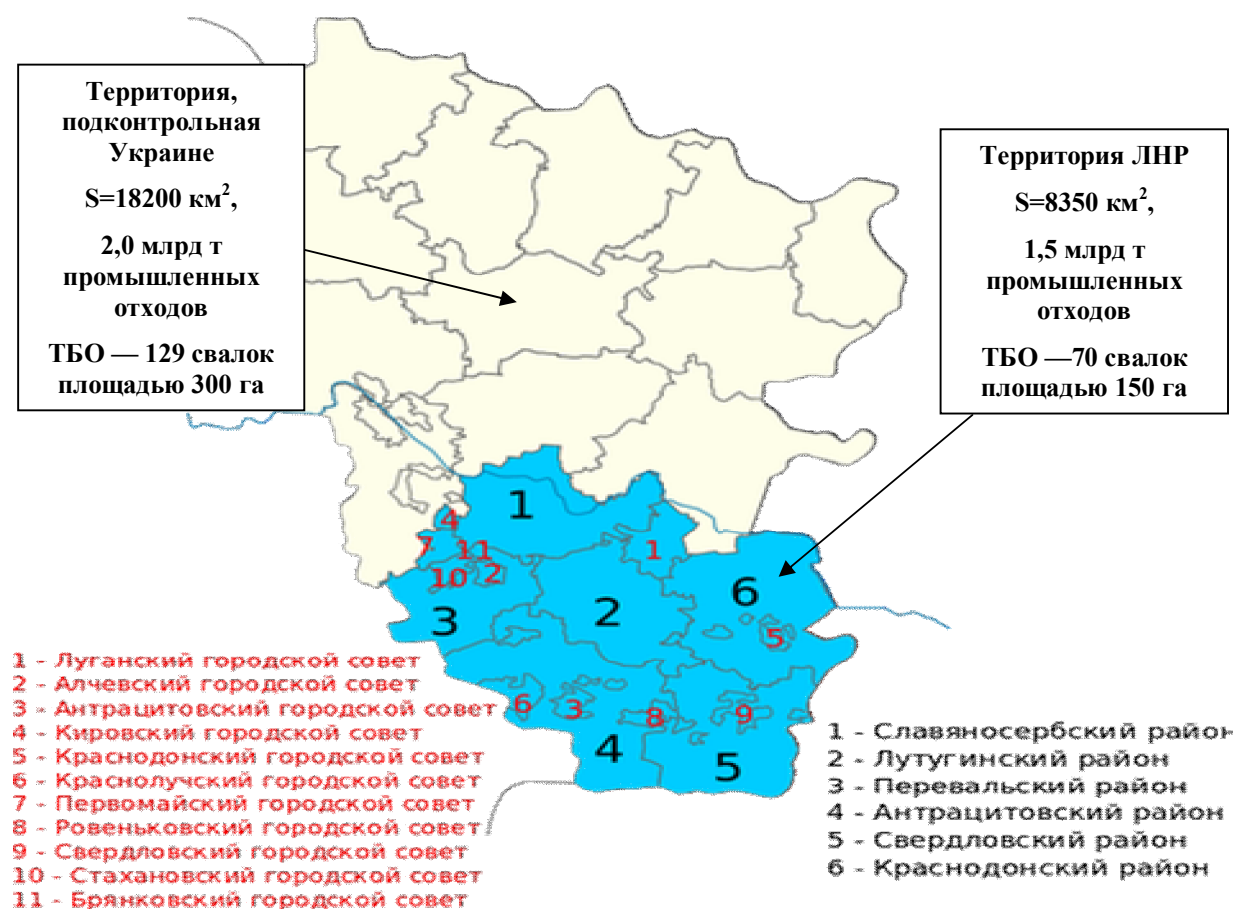


Рисунок 1 Карта-схема ЛНР

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

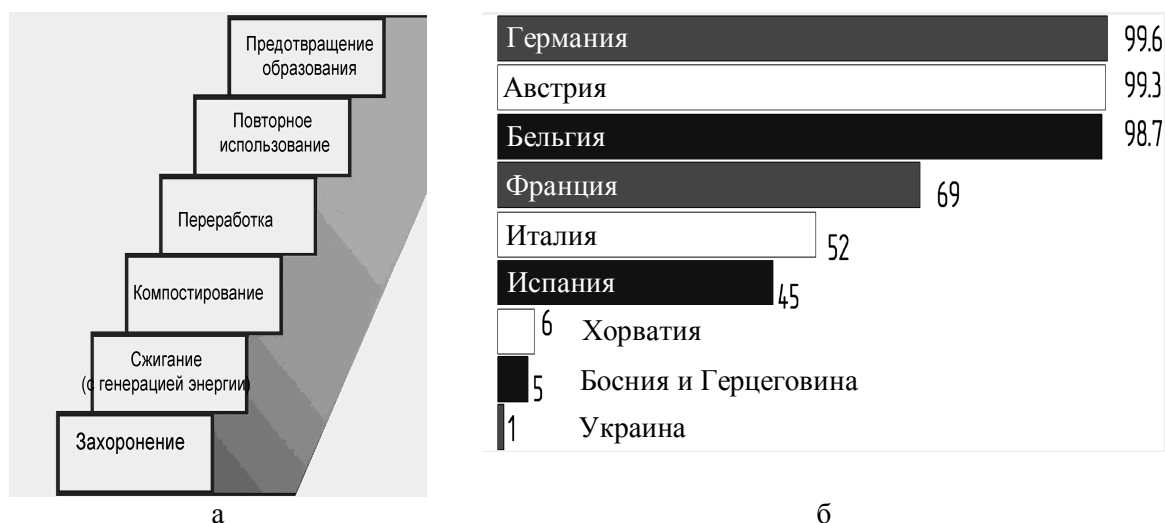


Рисунок 2 Основные этапы по обращению с ТБО (а) и уровень переработки отходов (%) в странах Европы (б)

Таблица 1

Эволюция системы управления и обращения с ТБО в Европе

| Настоящее время | |
|---|--|
| Отказ от захоронения неинертных фракций | |
| Развитие программ предотвращения и минимизации отходов | |
| 2003 г. | |
| Системы сбора свалочного газа | |
| Мусоросжигание с утилизацией энергии | |
| Раздельный сбор и глубокая переработка упаковки, электробытовых приборов, ламп, бытовых опасных отходов | |
| 1997 г. | |
| Переработка отходов в энергию | |
| Раздельный сбор и масштабная глубокая переработка отходов упаковки | |
| 1990 г. | |
| Региональные системы санитарных полигонов | |
| Мусоросжигание | |
| Пилотные проекты по сбору и переработке упаковки | |
| 1985 г. | |
| Неконтролируемое захоронение на свалках | |

Так, в г. Каире (Египет, население 8,1 млн человек, площадь 520 км²) люди, входящие в неформальный сектор, собирают третью часть отходов города (около 1 млн т/год). Только в одном районе города, Москаталия, расположено около 700 предприятий по сбору отходов. В этом процессе участвуют 80 посредников и 228 перерабатывающих производств [8].

В г. Мумбаи (бывший Бомбей, Индия, население 12,2 млн чел., площадь 620 км²)

горожане основали соседские ассоциации, которые собирают отдельно отходы — биоразлагающиеся и неразлагающиеся для компостирования и переработки. В ассоциации используется практика вермикомпостирования органических отходов и сотрудничество со старьевщиками для переработки других отходов. В настоящее время насчитывается около 650 таких ассоциаций, объединяющих 30000 чел.

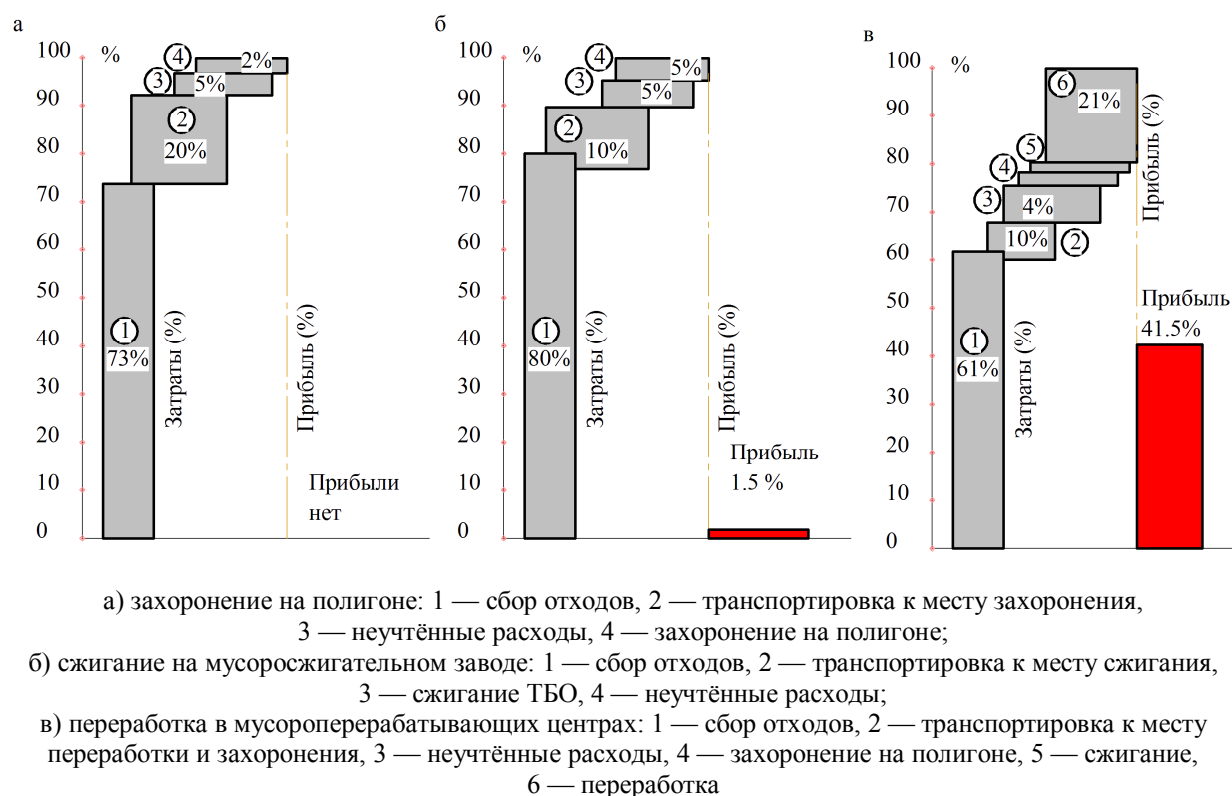
Данная информация интересна тем, что 2,5 % населения города без господомощи поддерживает экономику и экологическую безопасность крупнейшего города.

Именно экономические стимулы позволяют гражданам отдельных стран поддерживать экологическую ситуацию крупнейших городов в надлежащем состоянии и иметь доход, позволяющий создать свой бизнес, содержать семью и налогами поддерживать государство.

Сравнивая подход к обращению с отходами передовых европейских и менее развитых стран, можно отметить их основное отличие: у первых присутствует системный инновационный подход с постоянным совершенствованием системы управления и технологий переработки, у вторых — чисто инерционный экстенсивный подход, но в обоих случаях определяющая роль принадлежит рынку отходов. Эффективность это-

го рынка тесно связана с отраслью (сектором экономики) обращения с отходами.

Экономическая эффективность утилизации ТБО является основой для разработки стратегии создания сектора обращения с отходами. Представляют интерес данные по эффективности различных способов утилизации ТБО, приведённые харьковскими специалистами (рис. 3) [2]. Эти данные свидетельствуют, что применяемый ныне метод полигонного захоронения ТБО является неприбыльным. Сжигание ТБО на заводах характеризуется незначительной прибылью (ввиду малой эффективности использования тепловой энергии и высокой стоимости необходимых очистных установок). Третий вариант обращения с ТБО, основанный на сортировке и отборе полезной части отходов и вводе их в хозяйственный оборот в качестве вторичного сырья, является наиболее оптимальным в экономическом плане.



а) захоронение на полигоне: 1 — сбор отходов, 2 — транспортировка к месту захоронения,

3 — неучтённые расходы, 4 — захоронение на полигоне;

б) сжигание на мусоросжигательном заводе: 1 — сбор отходов, 2 — транспортировка к месту сжигания,

3 — сжигание ТБО, 4 — неучтённые расходы;

в) переработка в мусороперерабатывающих центрах: 1 — сбор отходов, 2 — транспортировка к месту переработки и захоронения, 3 — неучтённые расходы, 4 — захоронение на полигоне, 5 — сжигание,

6 — переработка

Рисунок 3 Экономическая эффективность различных способов утилизации ТБО

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Таким образом, аналогично зарубежному опыту, в регионе возможно и необходимо создание в сравнительно короткие сроки специализированной отрасли — сектора по управлению и обращению с отходами: координационного центра, системы сбора, транспортировки, заготовки, переработки и утилизации отходов с соответствующим законодательным сопровождением и финансовыми обязательствами, подчинёнными принципам экологической безопасности и экономической эффективности. Первейшей задачей для этого является информация о физическом объёме отходов.

Инвентаризация отходов ТБО и потенциальные выгоды от их утилизации. Согласно СНиП 2.07.01.89 (приложение 11) норма накопления ТБО на 1 жителя составляет 190–225 кг/год или 0,9–1,0 м³/год [12]. В соответствии с приведёнными нормами

проведена оценка образования ТБО в республике в целом (рис. 1).

Ежегодный прирост ТБО по городам и территориям ЛНР приведён в таблице 2. Таким образом, годовой прирост ТБО в ЛНР составляет более 1,5 млн м³ по объёму, или более 300 тыс. т по массе. Что же делать с этим «богатством»? На рисунке 4 приведён морфологический состав отходов (ТБО) 10-летней давности в Донбассе.

Ориентируясь на усреднённый морфологический состав ТБО в крупных городах Донбасса, приведём количественно-видовой состав твёрдых бытовых отходов (табл. 3). Необходимо отметить, что приведённые данные приблизительны, т. к. не учтена сезонность и местные особенности образования отходов и их влажность. Тем не менее порядок величин даёт возможность осуществлять оценочные действия.

Таблица 2

Образование ТБО объектами ЛНР

| Объект | | Наличное население, чел. | Масса отходов, т | Объём отходов, м ³ |
|--------|------------------------|--------------------------|------------------|-------------------------------|
| 1 | Луганск | 440 982 | 88 200 | 440 982 |
| 2 | Красный Луч | 120 135 | 24 020 | 120 135 |
| 3 | Алчевск | 107 984 | 21 600 | 107 984 |
| 4 | Свердловск | 96 074 | 19 200 | 96 074 |
| 5 | Краснодон | 101 076 | 20 200 | 101 076 |
| 6 | Стаханов | 89 117 | 17 820 | 89 117 |
| 7 | Ровеньки | 81 792 | 16 360 | 81 792 |
| 8 | Антрацит | 75 895 | 15 180 | 75 900 |
| 9 | Брянка | 51 813 | 10 360 | 51 813 |
| 10 | Первомайск | 37 706 | 7 540 | 37 706 |
| 11 | Кировск | 32 725 | 6 550 | 32 725 |
| 12 | Перевальский р-н | 69 116 | 13 830 | 69 116 |
| 13 | Лутугинский р-н | 65 470 | 13 100 | 65 470 |
| 14 | Славиносербский р-н | 53 465 | 10 700 | 53 465 |
| 15 | Антрацитовский р-н | 29 825 | 5 960 | 29 825 |
| 16 | Краснодонский р-н | 28 797 | 5 760 | 28 797 |
| 17 | Свердловский р-н | 11 610 | 2 300 | 11 610 |
| 18 | Попаснянский р-н | 5 927 | 1 190 | 5 930 |
| 19 | Станично-Луганский р-н | 2 734 | 500 | 2 730 |
| 20 | Всего по ЛНР | 1502143 | 300270 | 1503000 |

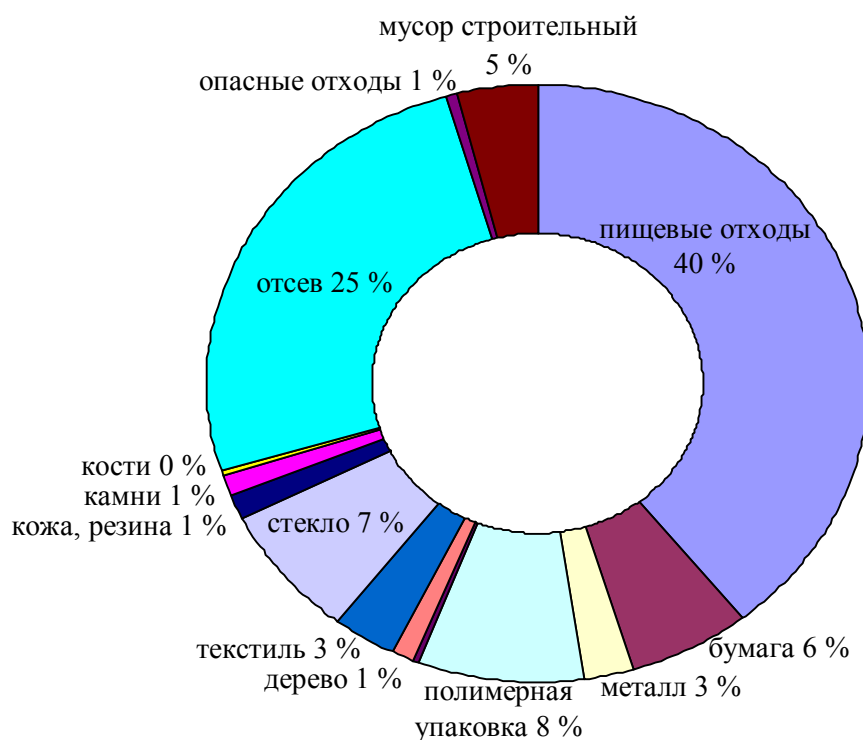


Рисунок 4 Усреднённый морфологический состав ТБО в крупных городах Донецкой области (2007 г.)

Таблица 3

Усреднённый годовой количественно-видовой состав твёрдых бытовых отходов в ЛНР

| Фракция | Содержание, % | Масса, т |
|---------------------------|---------------|----------|
| Пищевые отходы | 40 | 120 000 |
| Бумага | 6 | 18 000 |
| Металл | 3 | 9 000 |
| Полимерная упаковка, тара | 8 | 24 000 |
| Текстиль | 3 | 9 000 |
| Дерево | 1 | 3 000 |
| Резина, кожа | 1 | 3 000 |
| Строительный мусор | 5 | 15 000 |
| Опасные отходы | 1 | 3 000 |
| Стекло | 7 | 21 000 |
| Сор (смёт) | 25 | 75 000 |

Весь объём отходов условно разделим на 3 потока, ориентируясь на способ их утилизации:

- 1) относительно инертный мусор — сорт + строительный мусор (суммарно 30 %);
- 2) органические биоразлагаемые отходы — пищевые (40 %);
- 3) вторичные отходы — металл, бумага и т. п. (30 %).

Инертный мусор на данном этапе можно отправлять на захоронение.

Для пищевых отходов существует классический опыт утилизации — компостирование с последующим использованием компоста в аграрном секторе. В приведённой выше таблице отсутствуют данные о коммунальных отходах — осадках сточных вод (ОСВ), образующихся на очистных соору-

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

жениях канализации при очистке канализационных стоков. Только в Луганске ежегодно на иловых площадках образуется более 10 тыс. т таких осадков, а суммарно по республике — более 30 тыс. т. Повышенное содержание в осадках солей тяжёлых металлов ограничивает применение их в качестве

удобрений при использовании в сельском хозяйстве. Однако совместное их вермикомпостирование с пищевыми отходами позволяет получать почвогрунты, пригодные для использования в садовом хозяйстве и полеводстве, со свойствами, аналогичными компостным смесям (рис. 5; табл. 4, 5) [6, 7].



Рисунок 5 Компостирование отходов, вермикультура, вермикомпостирование, биогумус

Таблица 4

Стоимость компоста, почвогрунта (опт) [3]

| № п/п | Наименование | Цена за 1 м ³ , руб. (самовывоз) | Цена за 1 м ³ , руб. (доставка от 100 м ³) | Цена с доставкой за машину 20 м ³ , руб. |
|-------|--|--|--|---|
| 1 | Почвогрунт (чернозём + компост) | 400 | 990 | 20000–22000 |
| 2 | Почвогрунт «садовый» (чернозём + компост + песок) | 400 | 1100 | 20000–22000 |
| 3 | Чернозём (100 %) | 500 | 1400 | 25000–28000 |
| 4 | Компост (перегной) | 400 | 980 | 20000–22000 |

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Таблица 5

Фасованная продукция [3]

| № п/п | Наименование | Цена за 5 кг (самовывоз с площадки), руб. | Цена за 1 мешок — 30 кг (самовывоз), руб. |
|-------|---|---|---|
| 1 | Биогумус (вермикомпост) | 70 | 250 |
| 2 | Почвогрунт «садовый» (чернозём + компост + песок) | 80 | 250 |

Эффект снижения опасности от действия тяжёлых металлов достигается за счёт эффекта *разбавления* (30 тыс. т ОСВ смешивается с 120 тыс. т пищевых отходов и *вермикомпостируется*). Вермикультура на 55 % снижает негативное действие токсиантов. При этом получают почвогрунт с насыпной плотностью 0,6–0,8 т/м³ общей массой 150 тыс. т объёмом примерно 200 тыс. м³. Предприятие или ряд предприятий по производству компоста или почвогрунта желательно располагать на предприятиях водоканала (по опыту КП «Лугансквода»). Для вычленения пищевых отходов из общей массы ТБО необходимо проводить их ручную или механизированную сортировку.

Таким образом, реализация на рынке продукта переработки пищевых отходов в виде компоста, биогумуса или почвогрунта по самым скромным подсчётам составит более 100 млн рублей.

Большинство представленных в таблице 3 фракций (бумага, металл, стекло, резина, кожа, пластиковые материалы, некоторые опасные отходы) являются классическим вторичным сырьём. Оно может ис-

пользоваться на специализированных предприятиях по прямому назначению как сырьё, а при отсутствии таких предприятий — реализовываться через посредников (такими являются приёмные пункты вторсырья). Потребность во вторсырьё сформировала и цены на сырьё и определённые требования к его качеству, строго регламентируемые рынком вторичного сырья.

Бумага. Макулатура — очень популярный вид вторсырья. Цены на макулатуру в Украине очень разные и отличаются для каждого города. В основном за 1 кг макулатуры приёмные пункты предлагают от 40 коп. Цена зависит и от сорта бумаги, которых существует довольно много. В мелких розничных пунктах приёма обычно не особо уделяют внимание качеству материала и принимают обычно либо бумагу, либо картон. А вот если сдать макулатуру в Украине оптом, то тут цена зависит как от её сорта, так и от пункта приёма непосредственно (табл. 6).

Реализация на рынке вторичного сырья макулатуры по средней цене 1120 грн.×2=2240 руб. за тонну позволит получить 2240×18000=40,4 млн руб.

Таблица 6

Стоимость макулатуры в Украине [3]

| Сорт макулатуры | За 1 кг, грн. | За 1 т, грн. |
|-----------------|---------------|--------------|
| МС-1А | 0,4–1,4 | 1100–2600 |
| МС-2А | 0,4–1,4 | 1000–2400 |
| МС-3А | 0,4–1,4 | 900–1400 |
| МС-4Б | 0,4–1,4 | 900–1500 |
| МС-5Б | 0,4–1,4 | 1100–1600 |
| МС-6В | 0,4–1,4 | 400–800 |

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Металл. Цена на металлолом в Украине зависит от качества материала, содержания в нём других веществ, а также от его объёма. Цены на лом различаются и зависят как от самого материала, так и от конкретного города и ценовой политики конкретного пункта. Приём металлолома оптом в Украине обходится дороже и является выгодной сделкой для обеих сторон (табл. 7, 8).

Реализация на рынке вторичного сырья чёрных металлов по средней цене $2500 \text{ грн.} \times 2 = 5000 \text{ руб.} \times 4500 = 22,5 \text{ млн руб.}$ и

цветного лома металлов по средней цене $25000 \text{ грн.} \times 2 = 50000 \text{ руб.} \times 4500 = 225 \text{ млн руб.}$ позволит получить $22,5 + 225 = 247,5 \text{ млн руб.}$

Стеклотара. Цены на стеклотару в Украине различаются. Каждый приёмный пункт устанавливает свою ценовую политику. Обычно приёмные пункты стеклотары принимают пивные бутылки, бутылки из-под водки и шампанского. Также идут в ход и жестяные банки, однако цена на них обычно меньше. Некоторые пункты принимают и банки объёмом 0,5 л, 1 л и 3 л (табл. 9). Стеклобой принимают по цене 500 грн./т.

Таблица 7

Цена чёрного лома в Украине, грн./т

| Марка лома | Розница | Опт |
|--------------------|-----------|-----------|
| 3А | 2000–2700 | 2200–2900 |
| 5А | 2000–2700 | 2200–2900 |
| 12А1 | 2000–2700 | 2200–2900 |
| 17А | 2000–2700 | 2200–2900 |
| Оцинкованная сталь | 750–950 | 800–1000 |

Таблица 8

Цена цветного лома в Украине, грн./кг

| Марка лома | Розница | Опт |
|--------------------|---------|-------|
| Медь | 60–64 | 64–66 |
| Бронза | 36–40 | 40–43 |
| Алюминий (микс) | 10–14 | 14–16 |
| Свинец | 10–14 | 14–16 |
| Магний | 5–8 | 8–10 |
| Титан | 23–26 | 26–28 |
| Латунь | 36–40 | 40–43 |
| Нерж. сталь от 8 % | 10–14 | 14–16 |

Таблица 9

Приёмочная стоимость стеклянной тары

| Вид тары | Цены за 1 ед., грн. |
|----------------------------|---------------------|
| бутылки из-под пива | 0,15–0,30 |
| бутылки из-под шампанского | 0,10–0,15 |
| бутылки из-под водки | 0,10–0,25 |
| банка 0,5 л | 0,12–0,15 |
| банка 1 л | 0,25–0,35 |
| банка 3 л | 1,25–1,70 |
| жестяная банка | 0,05–0,10 |

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Реализация на рынке стеклотары и стеклобоя отходов стекла по цене 500 грн. позволит получить порядка $500 \text{ грн.} \times 2 = 1000 \text{ руб.} \times 21000 = 21 \text{ млн руб.}$

Изделия из пластмасс. Полимерная упаковка. Пластиковые изделия (канистры, флаконы, садовая мебель, ПЭТ бутылки различного цвета, плёнка высокого давления, плёнка прозрачная термоусадочная, стретч-плёнка, полимерные пакеты, упаковочная тара) по своему составу весьма разнообразны: полистирол, поливинилхлорид, пропилен, полиэтилен высокого, среднего и низкого давлений и прочее. В зависимости от многих параметров (вида материала, цвета, степени загрязнения и

прочего) стоимость вторсырья колеблется в пределах 6–8 тыс. гривен за тонну.

Реализация на рынке вторичных ресурсов полимерных отходов по цене 7000 грн. позволит получить $7000 \text{ грн.} \times 2 = 14000 \text{ руб.} \times 24000 = 336 \text{ млн руб.}$

Аккумуляторы, батарейки. Из всего объёма мирового производства батареек и аккумуляторов перерабатывается только 3 %. На мировом рынке переработка батареек и аккумуляторов — довольно ограниченный, сложный и трудоёмкий, но одновременно довольно выгодный процесс (табл. 10), поэтому и реальная стоимость аккумуляторных отходов составляет от 250 \$ за тонну.

Таблица 10

Стоимость материала на тонну аккумуляторов и батарей

| Состав аккумулятора | Стоимость материала (за тонну) |
|------------------------|--------------------------------|
| Литий-кобальт-оксидный | 25000 \$ |
| Литий-железо-фосфатный | 400 \$ |
| Свинцово-кислотный | 1500 \$ |

Реализация на рынке вторичных ресурсов аккумуляторных отходов по цене 250 \$ позволит получить $250 \$ \times 60 = 15000 \text{ руб.} \times 3000 = 45 \text{ млн руб.}$

Завершая экономическую оценку бытового мусорного богатства Луганщины, можно констатировать, что при соответствующей организации компостирования биоразлагаемой части отходов может принести более 100 млн руб., а реализация некоторой части отходов как вторичных ресурсов дополнительно принесёт ещё 690 млн руб. Глубокая переработка отходов и их тщательная сортировка могут дополнительно повысить качество и цену сырья, что делает реальным достижение суммарной цифры до 1 млрд рублей в сфере обращения ТБО.

Промышленные отходы, как основа для развития шлакощелочной строительной индустрии. Из 1,5 млрд т промышленных отходов Луганщины особый интерес представляют шлаковые отходы металлургической промышленности (рис. 6).

Крупнейшим производителем шлаков на Луганщине является Алчевский меткомбинат. Химический состав образующихся на комбинате отходов в сравнении со строительными цементами приведён в таблице 11.

Химический состав шлаков не используется при их вовлечении в хозяйственный оборот, поэтому их утилизация сводится только к применению при отсыпке дорог либо при производстве шлаковых блоков и плит в строительной сфере с использованием цемента. Производство портландцемента, который является основным гидравлическим вяжущим в строительстве, в ЛНР отсутствует (крупнейшее предприятие по производству цемента мощностью 2 млн т/год расположено в ДНР). Имеющиеся в республике колоссальные запасы шлакового сырья и щелочных отходов химических производств позволяют создать собственную, альтернативную цементной промышленности, бесцементную шлакощелочную строительную индустрию, основанную исключительно

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

но на местных промышленных отходах. Соответствующее эколого-химическое и технологическое обоснование утилизации доменных шлаков в производстве вяжущих строительных материалов приведено в работах [4, 5, 11, 14, 15].

Применение промышленных отходов позволяет на 10...30 % снизить затраты на изготовление строительных материалов по сравнению с производством их из природного сырья, экономия капитальных вложений достигает 35..50 %.

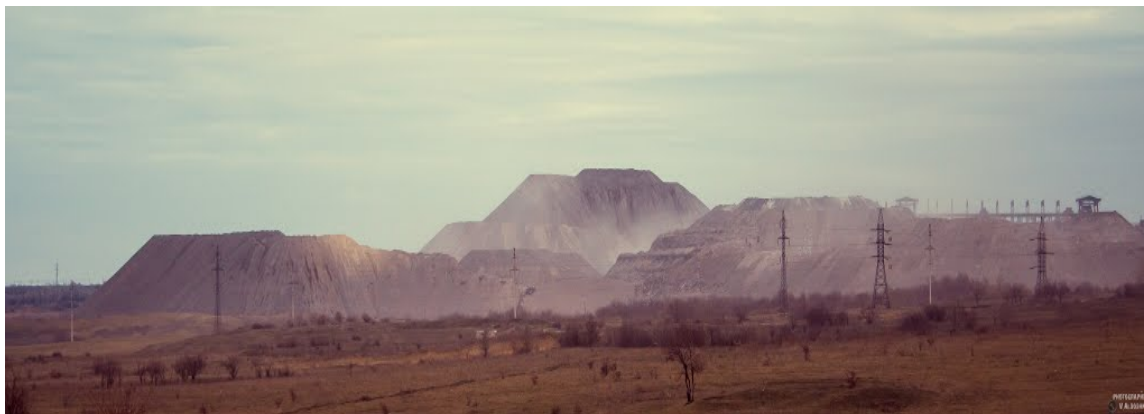


Рисунок 6 Восточная шлаковая гора Алчевского металлургического комбината

Таблица 11

Химический состав отходов АМК

| Материал | Химический состав, % | | | | | | |
|----------------------|----------------------|--------------------------------|------|------|------|------|--------------------------------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | GaO | MgO | S | FeO | Fe ₂ O ₃ |
| Доменный шлак | 38 | 6,7 | 48,3 | 3,7 | 1,55 | 0,4 | |
| Мартеновский шлак | 23,4 | 4,1 | 38,5 | 10,2 | 0,47 | 14,3 | 3,2 |
| Конвертерный шлак | 14,5 | 2,1 | 24,1 | 2 | 0,25 | 31,6 | 14,4 |
| Портландцемент | 22,5 | 6,5 | 62 | 1 | — | | |
| Глинозёмистый цемент | 7,5 | 45 | 40 | 0,5 | — | | |
| Известь гашёная | 1,3 | 0,3 | 70,7 | 1,1 | 0,02 | | |

Шлакощелочные вяжущие на основе отходов — это гидравлические вяжущие вещества, получаемые измельчением гранулированных шлаков совместно со щелочными компонентами или затворением молотых шлаков растворами соединений щелочных металлов (натрия или калия), дающих щелочную реакцию.

Шлакощелочные вяжущие предложены и исследованы под руководством В. Д. Глуховского в Киевском национальном университете строительства и архитектуры.

Для получения шлакощелочных вяжущих применяют гранулированные шлаки — доменные, электротермофосфорные, цветной металлургии. Необходимое усло-

вие активности шлаков — это наличие стекловидной фазы, способной взаимодействовать со щелочами. Тонкость помола должна соответствовать удельной поверхности не менее 3000 см²/г.

В качестве щелочного компонента применяют каустическую и кальцинированную соду, поташ, растворимый силикат натрия и др. Обычно используют также попутные продукты промышленности: плав щелочей (содовое производство); содощелочной плав (производство капролактама); содопоташную смесь (производство глинозёма) и т. п. Использование щелочесодержащих отходов позволяет получать значительные объёмы шлакощелочных

вяжущих. Оптимальное содержание щелочных соединений в вяжущем в пересчёте на Na_2O составляет 2–5 % массы шлака.

Для шлаков с модулем основности (M_0) больше единицы могут применяться все щелочные соединения или их смеси, дающие в воде щелочную реакцию, для шлаков с $M_0 < 1$ только едкие щёлочи и щелочные силикаты с модулем 0,5–2, несиликатные соли слабых кислот и их смеси могут быть использованы только в условиях тепловлажностной обработки.

По пределу прочности при сжатии через 28 суток шлакощелочные вяжущие подразделяют на марки от М300 до М1200. Для ускорения набора прочности и уменьшения деформативности в вяжущее вводят добавку цементного клинкера (2–6 %, масс). Предел прочности при сжатии быстротвердеющего шлакощелочного вяжущего в возрасте 3 суток для марок М400 и М500 составляет не менее 50 % марочной прочности, а для марок М600–М1200 — не менее 30 МПа.

Шлакощелочные вяжущие восприимчивы к действию тепловлажностной обработки. При температуре пропаривания 80–90 °С цикл обработки может быть сокращён до 6–7 ч, активная часть режима составляет 3–4 ч. Можно значительно снизить и максимальную температуру пропаривания, а также использовать ступенчатые и пиковые режимы обработки.

Шлакощелочные вяжущие обладают высокой коррозионной стойкостью и биостойкостью. Щелочные компоненты выполняют роль противоморозных добавок, поэтому вяжущие интенсивно твердеют при отрицательных температурах.

Исследованиями В. Д. Глуховского, П. В. Кривенко, Е. К. Пушкаревой, Р. Ф. Руновой и др. разработан ряд специальных шлакощелочных вяжущих: высокопрочных, быстротвердеющих, безусадочных, коррозионностойких, жаростойких, тампонажных.

Экономическая эффективность их высока. Удельные капиталовложения на производство этих вяжущих в 2–3 раза мень-

ше, чем при производстве портландцемента, так как отсутствуют фондо-, капиталоемкие технологические операции: не нужны разработка месторождений, подготовка сырья, дробление, обжиг и др. Сравнение затрат на производство шлакощелочных вяжущих марок М600–М1200 и портландцемента марки М600 показывает, что их себестоимость ниже в 1,7–2,9 раза, удельный расход условного топлива — в 3–5, электроэнергии — в 2, приведённые затраты в 2–2,5 раза меньше, чем при производстве портландцемента.

Процесс изготовления вяжущего включает операцию сушки шлака до остаточной влажности 0–1 % и совместный помол компонентов (рис. 7).

Для изготовления шлакощелочного вяжущего шлак и активная минеральная добавка со склада 1 поступают в сушильный барабан 2. Добавка после сушки измельчается на вальцах 3. Подсушенные силикатные компоненты загружают в расходные бункеры 4, 5.

Щёлочь является гигроскопичным материалом, поэтому её вводят в бетонную смесь с водой затворения. Если в качестве активатора используется кальцинированная сода или содосодержащие отходы производства, то целесообразно их измельчить совместно со шлаком. В этом случае активатор со склада 10 поступает в сушильный барабан 9 и измельчается на вальцах 8, после чего загружается в бункер 6. Из расходных бункеров отдозированные компоненты через дозаторы 7 загружают в мельницу 11, где их измельчают до удельной поверхности 3000...3500 $\text{см}^2/\text{г}$. Изготовленное вяжущее поступает на склад 12. При использовании гигроскопичного щелочного компонента, растворимого стекла они вводятся с водой затворения непосредственно в бетономешалку при приготовлении бетонной смеси. Плотность раствора в зависимости от вида щелочного компонента находится в пределах 1,15...1,3 $\text{г}/\text{см}^3$. В данном случае помолу подвергается только шлак или шлак с алюмосиликатными добавками.

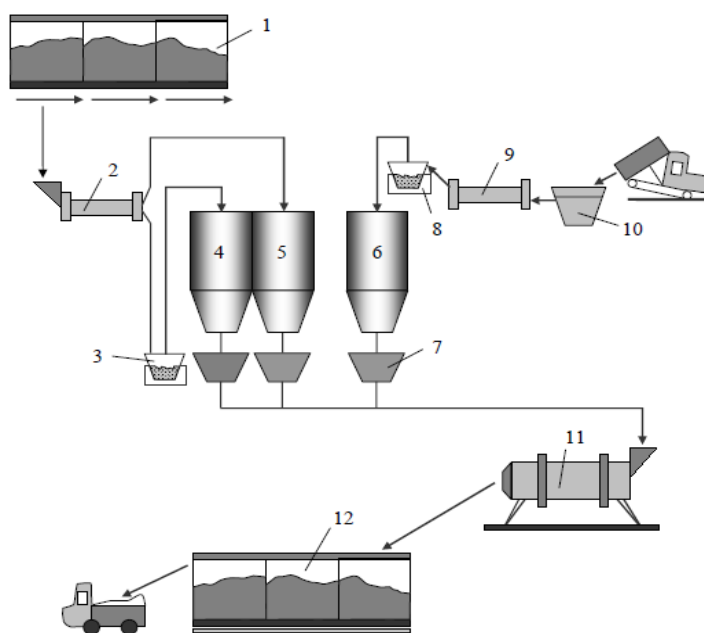


Рисунок 7 Технологическая схема получения шлакощелочного вяжущего

Технология изготовления конструкций из шлакощелочных бетонов состоит из таких операций, как приготовление бетонной смеси, подготовка формы (чистка, смазка, армирование), формование изделия и тепловлажностная обработка. При использовании готового шлакощелочного цемента возможны два варианта приготовления бетонной смеси:

1) одноступенчатый, при котором все компоненты смеси загружают и перемешивают в смесителе;

2) двухступенчатый, при котором для улучшения условий растворения щелочного компонента шлакощелочной цемент предварительно затворяют в специальном смесителе горячей водой, перемешивают в течение 5 минут, затем подают в бетономешалку принудительного действия, где он перемешивается с заполнителем. При помоле шлака без щелочного компонента приготовление бетонной смеси также осуществляется двухступенчатым способом: щелочной компонент в специальном смесителе затворяют водой и перемешивают до полного растворения, затем раствор подают в бетономешалку и перемешивают с заполнителями.

Процессы подготовки опалубки и оснащение её арматурой не отличаются от аналогичных операций при производстве армированных изделий на других вяжущих (рис. 8).

Бетонную смесь приготавливают в смесительных агрегатах 4, куда со склада 1 через расходные бункеры 2 и 3 подают сырьевые компоненты. Увлажнённую и перемешанную смесь выгружают в бетоноукладчик 5, с помощью которого транспортируют к месту укладки.

При использовании дисперсных заполнителей для приготовления шлакощелочных бетонов перемешивание необходимо производить в бетоносмесителях, обеспечивающих высокую гомогенизацию бетонной смеси. В этих случаях целесообразно применять двухстадийное перемешивание и последовательное введение компонентов в смесь. На первой стадии готовится вяжущее тесто: в воду затворения с растворённым в ней активатором твердения вводится последовательно вяжущее, а затем дисперсный наполнитель. Для повышения производительности на этом этапе вяжущее и наполнитель могут вводиться совместно в виде заранее приготовленной смеси. Однако целесообразность такой про-

цедуры перемешивания должна быть предварительно проверена с точки зрения возможного снижения прочностных характеристик бетона. На второй стадии полученное вяжущее тесто перемешивается с мелким и крупным заполнителем.

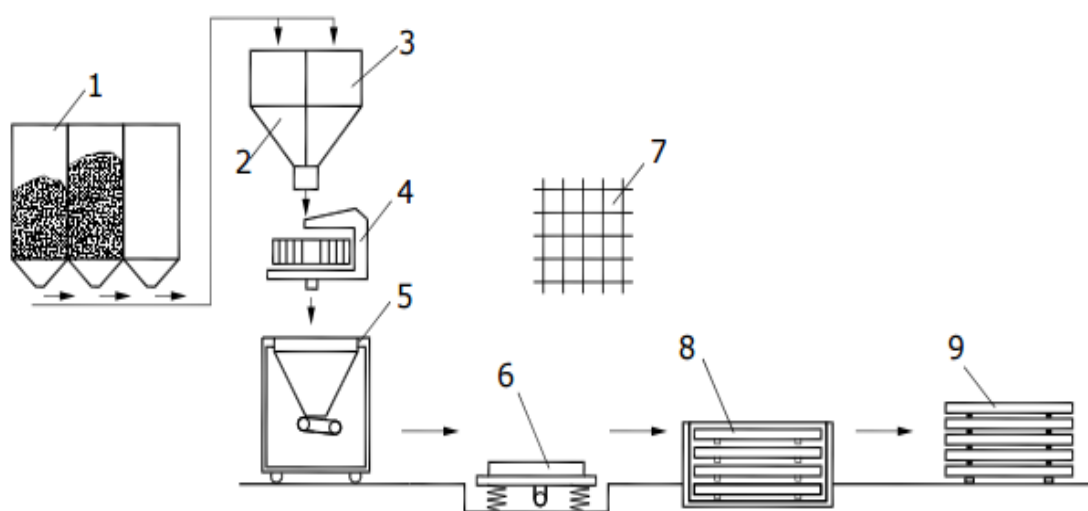
Бетонные смеси с высоким содержанием дисперсного наполнителя или минеральной добавки характеризуются низкой пластичностью. Такие смеси могут формироваться при интенсивном вибрационном уплотнении, а также виброуплотнении с пригрузом, а особо жёсткие смеси — при вибропрессовании или прессовании.

В целом технология шлакощелочных бетонов сходна с традиционными технологиями цементного бетона. Это позволяет без значительных затрат на техническое перевооружение перевести производство железобетонных конструкций и бетонных изделий на основе портландцемента на аналогичные изделия из шлакощелочного бетона или бетона на основе других видов вяжущих щелочной активации, а именно минерально-щелочных, геошлаковых, геосинтетических, геополимерных и др.

Расчеты Л. И. Дворкина затрат на производство шлакощелочных вяжущих марок 600...1200 и портландцемента марки 600 показывают, что у шлакощелочных вяжущих по сравнению с портландцементом ниже: себестоимость — в 1,7...1,9 раза, удельный расход топлива — в 3...5 раз, электроэнергии — в 2 раза, приведённые затраты — до 2...2,5 раз.

При производстве бетонов на основе шлакощелочных вяжущих используют и заполнители различных видов из шлакового сырья: шлаковый щебень отвалных металлургических шлаков или литой шлаковый щебень, пористые шлаки, шлаковый наполнитель, лёгкие шлаковые заполнители, гранулированный шлак, шлаковую пемзу.

В довоенное время годовая потребность в цементе на Луганщине превышала 100 тыс. т. Перевод строительной отрасли на шлакощелочные строительные материалы и бетоны позволит, с одной стороны, уменьшить количество промышленных отходов на эту величину, а с другой стороны, произведённая из этих отходов продукция в денежном выражении превысит 20 млрд рублей.



1 — склад заполнителя и шлакощелочного вяжущего; 2, 3 — расходные бункеры; 4 — бетоносмеситель; 5 — бетоноукладчик; 6 — виброустановка; 7 — арматурный цех; 8 — термообработка; 9 — склад изделий и конструкций

Рисунок 8 Технологическая схема производства изделий и конструкций из шлакощелочных бетонов

Выводы:

1. Годовое образование твёрдых бытовых отходов в ЛНР объёмом 300000 т при создании специальной отрасли управления и обращения с отходами и соответствующей организации её деятельности может быть вовлечено в хозяйственный оборот с экономическим эффектом до 1 млрд рублей.

2. Для Луганщины с её высокой техногенной нагрузкой представляется уникальная возможность создания строительной индустрии, основанной на использовании

в качестве сырья шлаков металлургических предприятий и щелочных отходов химических производств, являющейся альтернативой цементной промышленности.

3. Осуществление этого проекта позволит улучшить экологическую ситуацию в регионе за счёт вовлечения в хозяйственный оборот отходов промышленности, создать новые уникальные предприятия и новые рабочие места, насытить рынок востребованной продукцией и существенно укрепить экономику.

Библиографический список

1. Артамонова, А. В. Шлакощелочные вяжущие на основе доменных гранулированных шлаков центробежно-ударного измельчения [Текст] / А. В. Артамонова, К. М. Воронин // Цемент и его применение. — 2011. — С. 108–113.
2. Гриценко, А. В. Технологические основы промышленной переработки отходов мегаполиса [Текст] / А. В. Гриценко, И. В. Коринько, А. Н. Туренко. — Харьков : ХНАДУ, 2007. — 340 с.
3. Вторичные ресурсы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://vitorresurs.com.ua> (20.03.2017).
4. Дворкин, Л. И. Строительные материалы из отходов промышленности [Текст] / Л. И. Дворкин, И. А. Паиков. — К. : Выща школа, 1989. — 340 с.
5. Дворкин, Л. И. Строительные материалы из отходов промышленности [Текст] / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. — К. : Выща школа, 2007. — 189 с.
6. Дрозд, Г. Я. Развитие сектора обращения с твёрдыми бытовыми отходами на Луганщине — настоятельная необходимость [Текст] / Г. Я. Дрозд // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — Алчевск : ДонГТУ, 2017. — С. 16–28.
7. Дрозд, Г. Я. Биотехнологические вопросы утилизации осадков сточных вод [Текст] / Г. Я. Дрозд, Е. Н. Папутина, С. И. Давыдов // Вода и экология. Проблемы и решения. — Санкт-Петербург, 2014. — С. 66–78.
8. Задорский, В. М. Поэма о мусоре [Текст] / В. М. Задорский // Сб. научных статей «Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов». — Харьков : ХИСИ, 2007. — С. 306–318.
9. ТБО в Украине : потенциал развития. Сценарии развития сектора с твёрдыми бытовыми отходами : отчёт IFG в Украине. — Киев : IFG, 2014. — 100 с.
10. Eurowaste. Types of waste [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.eurowaste.be/types-of-waste.html> (20.03.2017).
11. Микульский, В. Г. Строительные материалы. Материаловедение и технология [Текст] / В. Г. Микульский, Г. И. Горчаков, В. В. Козлов. — М. : Зодчий, 2002. — 150 с.
12. СНиП 2.07.01-89*. Планировка городских и сельских населённых мест [Текст]. — Введ. 1990.13.07. — М. : Изд-во стандартов, 1990.
13. Свалки в Украине по площади достигли территории Черногории [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://gigamir.net/news/economy/pub210690> (16/09/2012).
14. Черепанов, К. А. Утилизация вторичных материальных ресурсов в металлургии [Текст] / К. А. Черепанов и др. — М. : Металлургия, 1994. — 219 с.
15. Хоботова, Э. Б. Эколого-химическое обоснование утилизации отвальных доменных шлаков в производстве вяжущих материалов [Текст] / Э. Б. Хоботова, Ю. С. Калмыкова // Экологическая химия. — 2012. — № 21 (1). — С. 27–37.

Рекомендована к печати директором Института строительства, архитектуры и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля, д.т.н., проф. Андрійчуком Н. Д., к.т.н., доц., и. о. зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В.

Статья поступила в редакцию 08.06.18.

д.т.н. Дрозд Г. Я. (ІБАіЖКГ ЛНУ ім. В. Даля, м. Луганськ, ЛНР, drozd.g@mail.ru)

ПОТЕНЦІАЛ РОЗВИТКУ СЕКТОРА ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ НА ЛУГАНЩИНІ

Розглянуто проблему утилізації твердих побутових і промислових відходів в промисловому регіоні Донбасу. В результаті узагальнення зарубіжного досвіду в сфері поводження з відходами та зіставлення з існуючими регіональними умовами обґрунтовано необхідність і можливість створення спеціальної галузі — сектора поводження з відходами. Показано потенційну його ефективність як в екологічному, так і в економічному аспектах: у сфері побутових відходів тільки 30 % їх обсягу підлягає схороненню, а частина, що залишилася, переробляється або у вигляді вторинних ресурсів вартістю до 1 млрд рублів повертається до господарського обігу. У сфері промислових відходів показано можливість створення шлаколужної будівельної індустрії, заснованої виключно на місцевих промислових відходах для виробництва будівельної продукції вартістю десятки мільярдів рублів.

Ключові слова: *тверді побутові та промислові відходи, утилізація, екологічна безпека, вторинна сировина.*

Doctor of Tech. Sc. Drozd G. Ya. (IBA and HCS LNU after V. Dahl, Lugansk, LPR, drozd.g@mail.ru)

DEVELOPMENT POTENTIAL OF THE MUNICIPAL WASTE SECTOR IN LUGANSCHINA

There has been studied the problem of solid waste and industrial waste utilization in the industrial Donbass region. The generalization of foreign practice in waste management sector and comparing to the existing regional conditions there has been proved the necessity and possibility to develop the special branch — waste management sector. There has been given its potential efficiency both in economic and ecological aspects: for household waste only 30 % of its volume is buried, the rest is recycled or in the form of secondary raw materials with 1 billion rubles cost is back into economic circulation. In the industrial waste sector there has been given the possibility to form the slag-alkali construction industry, purely based on the local industrial wastes for producing building materials with tens of billions rubles benefit.

Key words: *solid household and industrial waste, utilization, environmental safety, secondary raw materials.*

УДК 625.7/8

Рябинина М. М.

(ЛНАУ, г. Луганск, ЛНР, m.ryabinina2014@yandex.ua)

ВЛИЯНИЕ ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА СОСТОЯНИЕ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Статья посвящена изучению влияния высоких температур воздуха в летний период на покрытие автомобильных дорог территории Донбасса.

Ключевые слова: автомобильная дорога, температурный режим воздуха, асфальтобетонное покрытие.

Влияние погодно-климатических условий на состояние дорожных покрытий изучено недостаточно подробно в зависимости от региональных особенностей, которые влияют на эксплуатационные условия автомобильных дорог.

Под воздействием изменения температуры воздуха, солнечной радиации, скорости ветра и типа покрытия изменяется его температура, что влияет на прочность, долговечность, эксплуатируемость.

Напряжённо-деформированное состояние и сроки службы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог зависят от температуры. Однако при проектировании и расчёте нежестких дорожных одежд по критериям прочности, ориентированным на неблагоприятные условия эксплуатации, не учитывается в должной степени реологическое состояние асфальтобетона. Поэтому уточнение зависимости температуры асфальтобетона от условия эксплуатации является в настоящее время актуальным. Известно, что температура асфальтобетонного покрытия является функцией температуры воздуха, при этом она существенно зависит от солнечной радиации, хода температур в грунте земляного полотна и от многих других факторов.

В зимнее время асфальтобетонное покрытие сохраняет более высокую температуру, чем минимальная температура окружающего воздуха: чем резче происходит понижение температуры воздуха, тем больше будет отличаться от неё температура покрытия из-за тепловой инерции дорожной конструкции.

В летний период зависимость температуры асфальтобетонного покрытия от температуры окружающего воздуха будет другая, причём влияние дополнительного нагревания асфальтобетона лучами солнца станет значительно выше. Суточные колебания температуры покрытия летом более резкие, чем зимой.

Значение максимальных и минимальных температур асфальтобетонного покрытия обычно используются при выборе марки и обосновании температур испытания битумного вяжущего.

Максимальная температура асфальтобетонного покрытия рассчитывается на глубине 2 см, исходя из средней температуры воздуха наиболее тёплого семидневного периода. При этом для каждого года наблюдений за ходом температур воздуха устанавливается наиболее жаркий семидневный период и вычисляется средняя максимальная температура для этого периода. Считается, что средняя температура наиболее тёплой семидневки является оптимальной для определения высокотемпературных свойств асфальтобетонных покрытий. Исследованию максимальных температур асфальтобетонных покрытий посвящены многие труды [1–5]. Исходя из теплового баланса, предложено следующее уравнение для определения высокой расчётной температуры покрытия [3]:

$$T_2^{\max} = 0,9545 \cdot (T_{\text{ср}} - 0,00618 \text{Ш}^2 + 0,2289 \text{Ш} + 42,2) - 17,18, \quad (1)$$

где T_2^{\max} — максимальная расчётная температура покрытия на глубине 2 см, °С;

T_{67} — семидневная средняя максимальная температура воздуха, °С;

III — географическая широта расположения объекта в градусах.

Зависимость температуры покрытия от температуры воздуха предложена Б. И. Ладыгиным [4]:

$$T_n = 1,3T_6 + 7, \quad (2)$$

где T_n — температура покрытия, °С;

T_6 — температура воздуха, °С.

Температура покрытия находится, как правило, в пропорциональной зависимости от температуры окружающего воздуха. По данным исследований профессора Б. И. Ладыгина, температуру покрытия можно определить в зависимости от температуры воздуха.

Однако данная формула не является универсальной. Различия региональных, атмосферных и других условий приводят к существенному разбросу эксперименталь-

ных данных и отклонению от установленной зависимости.

Определение максимально возможной температуры асфальтобетонного покрытия от максимальной температуры воздуха [4]:

$$T_n^{\max} = -0,0306T_{\max}^2 + 3,8071T_{\max} - 39, \quad (3)$$

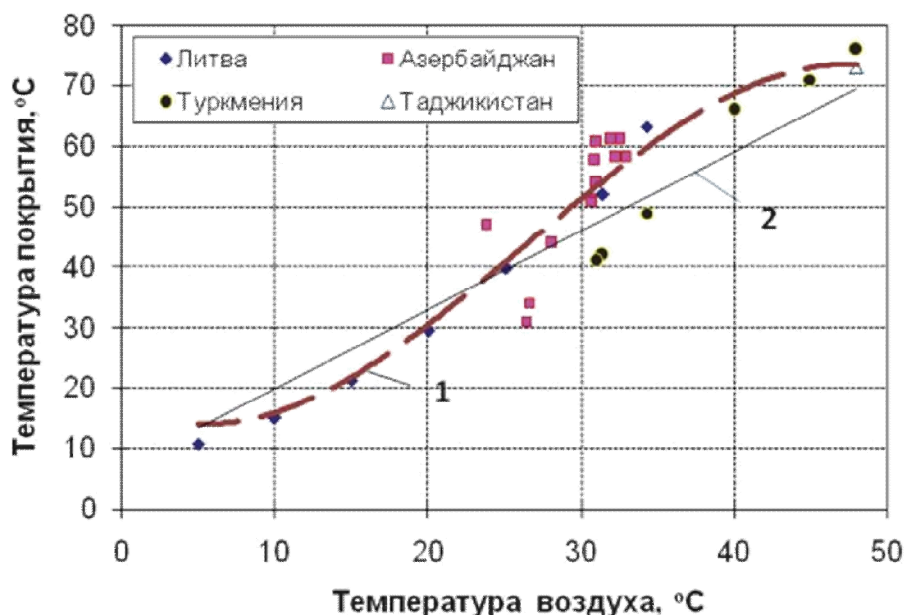
где T_n^{\max} — максимальная температура асфальтобетонного покрытия, °С;

T_{\max} — абсолютный максимум температуры воздуха, зарегистрированный в рассматриваемом регионе, °С.

По результатам исследований Г. Н. Кирухина проведена аппроксимация экспериментальных данных (рис. 1).

Была экспериментально изучена температура асфальтобетонного покрытия летом в Луганской области в зависимости от температуры воздуха (табл. 1).

На основании экспериментальных данных (табл. 1) построен график зависимости температуры дорожного покрытия от температуры окружающего воздуха на территории города Луганской области (рис. 2).



1 — обобщенная линия тренда; 2 — зависимость Б. И. Ладыгина [4]

Рисунок 1 Влияние температуры окружающего воздуха на температуру асфальтобетонных покрытий

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Таблица 1

Данные по замерам температуры окружающего воздуха и асфальтобетона летом 2016 г.
на территории г. Луганска

| Дата замера | Время замера | Температура воздуха в тени, °С | Температура асфальтобетона, °С | Разница между температурой воздуха и асфальтобетона, °С | Разница между температурой воздуха по часам, °С | Разница между температурой асфальтобетона по часам, °С |
|-------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|---|---|--|
| 14.07. 2016 | 11:00 | 32,5 | 49,5 | 17 | | |
| | 14:00 | 38 | 58 | 20 | 5,5 | 8,5 |
| | 16:00 | 37 | 54 | 17 | 1 | 4 |
| | 18:00 | 36 | 49 | 13 | 1 | 5 |
| 15.07. 2016 | 8:00 | 26,5 | 37 | 10,5 | | |
| | 10:00 | 31 | 46,5 | 15,5 | 4,5 | 9,5 |
| | 12:00 | 36 | 51 | 15 | 5 | 4,5 |
| | 14:00 | 39 | 60,5 | 21,5 | 3 | 9,5 |
| | 16:00 | 37 | 54 | 17 | 2 | 6,5 |
| | 18:00 | 35,5 | 48 | 12,5 | 1,5 | 6 |
| 16.07. 2016 | 8:00 | 28 | 40 | 12 | | |
| | 10:00 | 32 | 45 | 13 | 4 | 5 |
| | 12:00 | 36,5 | 52 | 15,5 | 4,5 | 7 |
| | 14:00 | 39,5 | 61,5 | 22 | 3 | 9,5 |
| | 16:00 | 38,5 | 59 | 20,5 | 1 | 2,5 |
| | 18:00 | 37 | 54,5 | 17,5 | 1,5 | 4,5 |
| 17.07. 2016 | 8:00 | 29 | 41 | 12 | | |
| | 10:00 | 32,5 | 48 | 15,5 | 3,5 | 7 |
| | 12:00 | 37 | 55 | 18 | 4,5 | 7 |
| | 14:00 | 40 | 63 | 23 | 3 | 8 |
| | 16:00 | 38,5 | 59,5 | 21 | 1,5 | 3,5 |
| | 18:00 | 36 | 54,5 | 18,5 | 2,5 | 5 |
| 18.07. 2016 | 8:00 | 28 | 40 | 12 | | |
| | 10:00 | 33 | 49 | 16 | 5 | 9 |
| | 12:00 | 37 | 54 | 17 | 4 | 5 |
| | 14:00 | 39 | 60 | 21 | 2 | 6 |
| | 16:00 | 37,5 | 54,5 | 17 | 1,5 | 5,5 |
| | 18:00 | 36 | 53 | 17 | 1,5 | 1,5 |
| 19.07. 2016 | 8:00 | 23 | 33 | 10 | | |
| | 10:00 | 25 | 36 | 11 | 2 | 3 |
| | 12:00 | 28 | 41 | 13 | 3 | 5 |
| | 14:00 | 31,5 | 45 | 13,5 | 3,5 | 4 |
| | 16:00 | 30 | 44 | 14 | 1,5 | 1 |
| | 18:00 | 27 | 43 | 16 | 3 | 1 |
| 20.07. 2016 | 8:00 | 21 | 30 | 9 | | |
| | 10:00 | 22 | 31 | 9 | 1 | 1 |
| | 12:00 | 23,5 | 33 | 9,5 | 1,5 | 2 |
| | 14:00 | 25 | 35 | 10 | 1,5 | 2 |
| | 16:00 | 24 | 34 | 10 | 1 | 1 |
| | 18:00 | 22,5 | 33 | 10,5 | 1,5 | 1 |

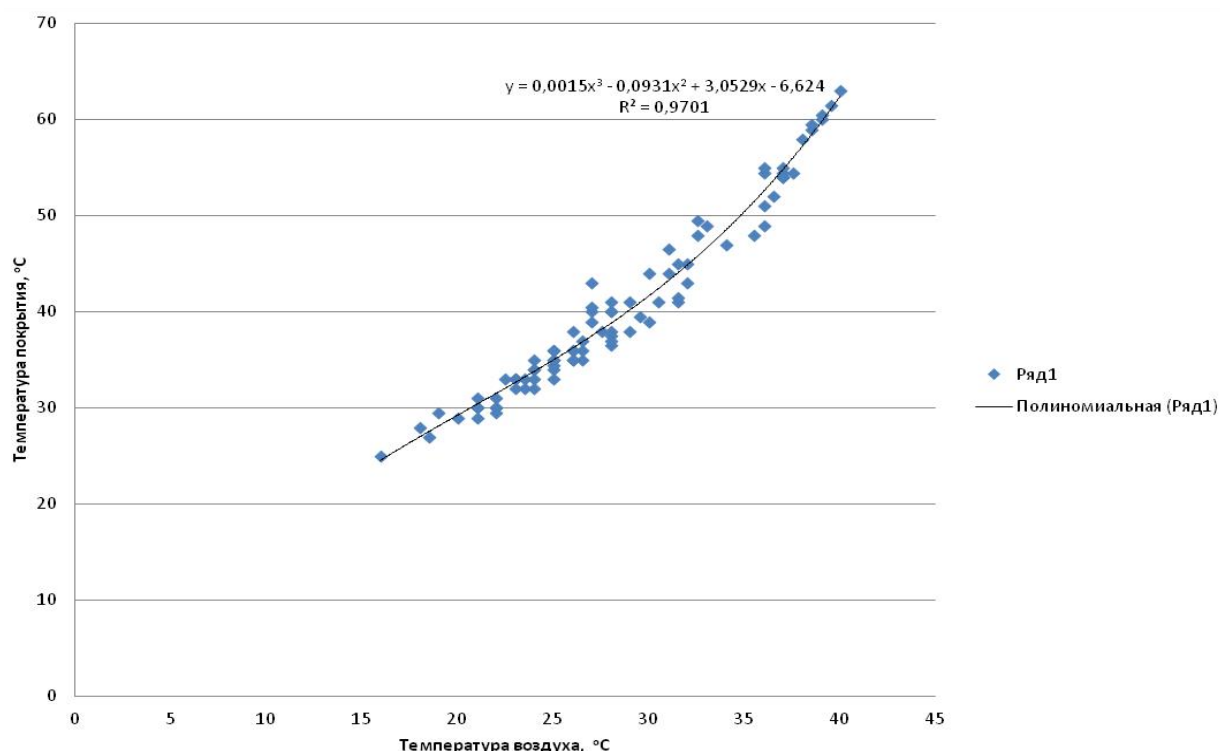


Рисунок 2 Изменение температуры покрытия в зависимости от температуры воздуха на территории Луганской области

По представленным на рисунках 1 и 2 графикам видно, что зависимости, основанные на экспериментальных данных, всегда существенно отличаются от используемых теоретических обобщённых зависимостей 1–3.

При сравнении экспериментальных кривых (на рисунке 1 — обобщенная линия тренда [4], на рисунке 2 — полиномиальная кривая) наглядно видно, что для каждого отдельного региона зависимость температуры покрытия от температуры окружающего воздуха принципиально различается.

Для климатических условий Донбасса предложена следующая формула прогнозирования температуры асфальтобетонного покрытия в зависимости от температуры воздуха:

$$T_n = 0,0015T_g^3 - 0,0931T_g^2 + 3,0529T_g - 6,624. \quad (4)$$

Предложенная формула может быть использована при ограничении движения грузовых автомобилей в летний период в целях сохранения дороги Донбасса.

Выводы. Анализ существующих зависимостей температуры асфальтобетона от температуры воздуха показывает, что эти зависимости неприемлемы для условий Донбасса.

На основании экспериментальных данных получены зависимости температуры асфальтобетона от температуры воздуха.

Предложенная зависимость температуры асфальтобетона от температуры воздуха даёт возможность сохранить автомобильную дорогу от разрушения путём правильного ограничения времени движения грузовых автомобилей.

Библиографический список

1. Леонович, И. И. Диагностика и управление качеством автомобильных дорог [Текст] / И. И. Леонович, С. В. Богданович, И. В. Нестерович. — Минск : Новое знание, 2011. — 350 с.
2. Ладыгин, Б. И. Прочность и долговечность асфальтобетона [Текст] / Б. И. Ладыгин. — Минск : Наука и техника, 1972. — 187 с.
3. Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing [Text] / Asphalt Institute Superpave. — 1997. — Series No 1 (SP). — 67 p.
4. Кирюхин, Г. Н. Температурные режимы работы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог [Текст] / Г. Н. Кирюхин. — М. : РосдорНИИ, 2013. — № 2. — С. 309–328.
5. Рыбьев, И. А. Строительное материаловедение [Текст] / И. А. Рыбьев. — М. : Высшая школа, 2004. — 701 с. : ил.

© Рябинина М. М.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц., и. о. зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В.,
к.т.н., доц. каф. архитектуры ЛНАУ Бреусом Р. В.*

Статья поступила в редакцию 08.06.18.

Рябініна М. М. (ЛНАУ, Луганськ, ЛНР, *m.ryabinina2014@yandex.ua*)

ВПЛИВ ПОГОДНО-КЛІМАТИЧНИХ УМОВ НА СТАН ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ

Статтю присвячено вивченню впливу високих температур повітря в літній період на покриття автомобільних доріг на території Донбасу.

Ключові слова: *автомобільна дорога, температурний режим повітря, асфальтобетонне покриття.*

Riabinina M. M. (LNAU, Lugansk, LPR, *m.ryabinina2014@yandex.ua*)

INFLUENCE OF WEATHER AND CLIMATE CONDITIONS ON THE ROAD SURFACE STATE

The paper focuses on studying the influence of high outside temperatures in the summer time on the road surface within the territory of the Donbass region.

Key words: *highway, air temperature regime, asphalt concrete surface.*

УДК 628.356

Заворотный Д. В.

(ДонНАСА, г. Макеевка, ДНР, d.v.zavorotnyi@donnasa.ru)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОТЕНКОВ-ОСВЕТИТЕЛЕЙ С ЗАТОПЛЕННОЙ ЭРЛИФТНОЙ СИСТЕМОЙ АЭРАЦИИ

Представлены результаты экспериментальных исследований геометрически подобных моделей аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации. На основании полученных данных доказано, что определение максимальных допустимых скоростей течения потоков в проектируемом производственном аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации следует выполнять с соблюдением только геометрического подобия.

Ключевые слова: аэротенк-осветлитель, взвешенный слой, гидравлическая нагрузка, подобие, автомоделность, активный ил, аэротенк-отстойник, илоотделение.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. В биологической очистке городских сточных вод в настоящее время преобладают аэробные методы. Аэробная биологическая очистка подразумевает поддержание жизнедеятельности микроорганизмов (активного ила), которые осуществляют переработку биологически окисляемых веществ, и изъятие этих микроорганизмов из очищенной жидкости. На станциях очистки стоков от небольших населённых мест поддержание жизнедеятельности активного ила и его извлечение зачастую осуществляется в одном скомбинированном биореакторе, что позволяет снизить габариты сооружения и затраты на перекачивание очищаемой жидкости и возвратного ила. Илоотделение в аэротенках-отстойниках и аэротенках-осветлителях преимущественно происходит благодаря фильтрованию восходящего потока иловой смеси сквозь взвешенный слой ила. Для устранения некоторых проблем в эксплуатации аэротенков-отстойников с илоотделением во взвешенном слое был разработан усовершенствованный аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации [1].

Аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации (рис. 1) условно состоит из трёх зон: I — аэротенк, II — осветлитель, III — отстойник. В аэротенке

осуществляется биологическая очистка активным илом, аэрация которого обеспечивается при помощи затопленного эрлифта. Затопленный эрлифт состоит из аэратора 10 и стенки 7, которая отделяет образуемый газлифтным эффектом восходящий поток от остального объёма аэротенка. Подача воздуха в затопленную эрлифтную систему обеспечивается компрессором 2 и контролируется газовым счётчиком 1. Зона отстаивания III отделена от аэротенка I перегородкой 4 с наклонным козырьком 3. Нисходящий поток, возникающий в аэротенке за пределами эрлифта, провоцирует возникновение водоворотной зоны в осветлителе II. В водоворотной зоне имеют место нисходящее движение жидкости, в котором осуществляется рециркуляция иловой смеси из осветлителя в аэротенк, и восходящее движение, которое обеспечивает существование в зоне осветления взвешенного слоя с постепенно убывающей восходящей скоростью осветляемой жидкости. Границей между осветлителем и отстойником является поверхность илоразделения, визуально наблюдаемая через прозрачные стенки корпуса 6 модели аэротенка-осветлителя. Скорость восходящего потока жидкости в осветлителе зависит от расхода жидкости, который подаётся в сооружение насосом 9 и отводится по трубке 5 в ёмкость 8, а также от производительности затопленного эрлифта.

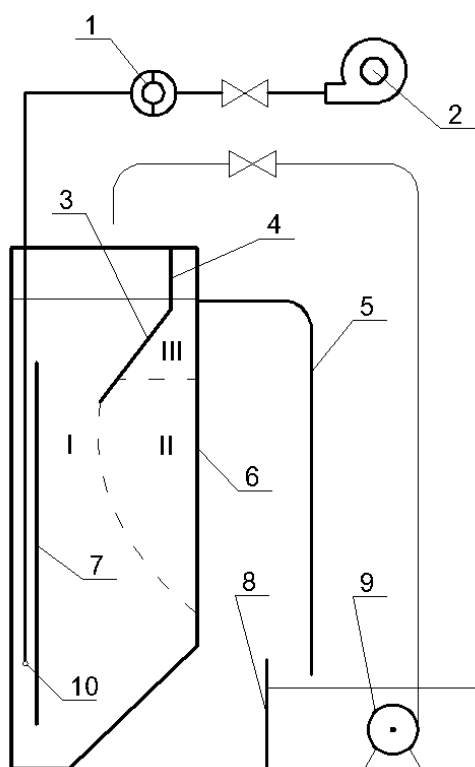


Рисунок 1 Схема экспериментальной установки аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации

На лабораторной модели исследуемого аэротенка-осветлителя (рис. 1) была подтверждена возможность рециркуляции в нём ила без дополнительного насосного оборудования, определены гидродинамические параметры, способствующие поддержанию частиц ила во взвешенном состоянии и осветлению иловой смеси [2, 3]. Данные относительно требуемых гидродинамических параметров производственного аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной аэрацией до настоящего времени не освещались.

При моделировании результатов лабораторных исследований на натурный промышленный объект необходимо соблюдать геометрическое, кинематическое и динамическое подобие.

Цель. Задачей экспериментальных исследований является определение критериальных параметров, которые необходимо учитывать при проектировании натурального аэро-

тенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации на основании данных лабораторных испытаний его модели.

Изложение материала и его результаты. При расчёте взвешенного слоя осветлителя значимыми факторами являются гидравлическая нагрузка, параметры фильтрующей загрузки (диаметр и плотность частиц) и физические свойства жидкости. Течение во взвешенном слое происходит в пористой зернистой среде, в которой режим движения восходящего потока определяется размерами пор, а не общей площадью осветлителя. При моделировании колонны осветлителя учитывается соответствие высоты и концентрации взвешенного слоя, но не принимается во внимание подобие поперечных размеров [4].

При расчёте водоворотных зон, образуемых за плохо обтекаемым телом, основными величинами являются скорость и геометрические параметры потока перед его расширением и после него. Постоянство критериев Рейнольдса и Фруда не является обязательным, если их изменение осуществляется в пределах области, в которой этим изменением можно пренебречь, то есть, когда выполняется автомодельность по данным критериям. Для выполнения автомодельности по числу Рейнольдса движения модельного и натурального потоков должны соответствовать квадратичной зоне сопротивления. Автомодельность по критерию Фруда выполняется при $Fr < 0,05 \div 0,1$ [5].

На рисунке 2 представлено графическое изображение модели аэротенка-осветлителя с указанием принятых обозначений линейных геометрических параметров.

В исследованной области модели аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации число Рейнольдса составило $Re \approx 2100 \div 4900$, число Фруда — $Fr \approx 3,5 \div 19,2 \cdot 10^{-3}$. Критерии определялись по формулам:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_{эжв}}{\mu}; \quad (1)$$

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot d_{\text{экв}}}, \quad (2)$$

где ρ — плотность иловой смеси, кг/м^3 ,
 v — средняя скорость течения жидкости в зазоре между наклонным козырьком и стенкой затопленного эрлифта, м/с ; $d_{\text{экв}}$ — эквивалентный диаметр сечения, вычисляемый по формуле 3, м ; μ — динамическая вязкость иловой смеси, $\text{Па}\cdot\text{с}$; g — ускорение свободного падения, м/с^2 .

$$d_{\text{экв}} = \frac{2 \cdot B_j \cdot L}{B_j + L}, \quad (3)$$

где L — длина аэротенка-осветлителя, мм ;
 B_j — расстояние между нижней кромкой наклонного козырька и стенкой затопленного эрлифта, мм .

Расчёт произведён для сечения, находящегося между стенкой затопленного эрлифта и нижней кромкой наклонного козырька.

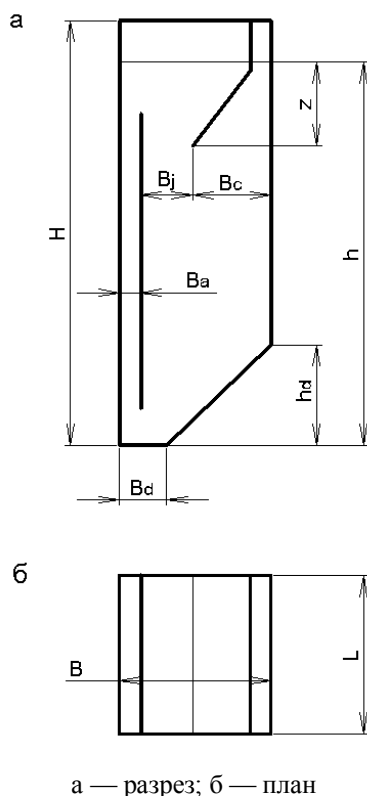


Рисунок 2 Обозначения размеров корпуса аэротенка-осветлителя

Критерий Фруда в модельном аэротенке-осветлителе гораздо меньше $0,05 \div 0,1$. В натурном сооружении, при соблюдении геометрического и кинематического подобия, число Фруда примет ещё меньшие значения. Следовательно, по критерию Фруда в области значений, соответствующих условиям модельного и натурального аэротенка-осветлителя, автомодельность выполняется.

Условие выполнения автомодельности по числу Рейнольдса значительно зависит от шероховатости стенок, а фактическое значение критерия весьма различно в сжатом и несжатом сечениях зоны аэротенка, в различных точках водоворотной зоны осветлителя, в порах зернистого взвешенного слоя активного ила. Касательно того, является ли исследуемая область автомодельной по критерию Рейнольдса, сложно сделать достоверный вывод на основании только теоретических данных.

С целью проверки автомодельности по критерию Рейнольдса была собрана вторая модель аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной аэрацией, геометрически подобная исходной модели. Модель 2 выполнена в масштабе 2:1 относительно исходной модели 1. Значения числа Рейнольдса в модели 2 вдвое превышают числа Рейнольдса в модели 1 при аналогичных величинах скоростей течения потоков. Критерий Рейнольдса в условиях натурального производственного аэротенка-осветлителя будет увеличиваться пропорционально линейным размерам, если осуществлять масштабирование с соблюдением геометрического и кинематического подобий. Если в модели число Рейнольдса достигает значения, соответствующего квадратичной области, то и в натурном объекте будет иметь место зона квадратичного сопротивления. Таким образом, в случае подтверждения автомодельности по критерию Рейнольдса в области исследуемых моделей подтвердится и автомодельность в области действия натурального сооружения.

Размеры исследуемых моделей аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации представлены в таблице 1.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Таблица 1
Значения размеров экспериментальных моделей

| Обозначение размера на рисунке 2 | Значение соответствующего размера, мм | |
|----------------------------------|---------------------------------------|----------|
| | Модель 1 | Модель 2 |
| H_p | 407 | 814 |
| h | 370 | 740 |
| h_d | 96 | 191 |
| z | 80 | 160 |
| B | 145 | 288 |
| B_a | 20 | 38 |
| B_j | 30 | 60 |
| B_c | 95 | 187 |
| B_d | 45 | 90 |
| L | 151 | 302 |

Измеренный расход подаваемой в аэротенк и осветляемой в осветлителе жидкости выражался через гидравлическую нагрузку на осветлитель q_r , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Гидравлическая нагрузка на осветлитель рассчитывалась по формуле 4, как отношение подачи насоса 9 к площади осветлителя на уровне нижней кромки наклонного козырька:

$$q_r = \frac{60 \cdot Q_n}{L \cdot B_c}; \quad (4)$$

Вычисление подачи затопленного эрлифта осуществлялось по зависимостям [6], исходя из объёма подаваемого в него воздуха. Расход циркулирующей в затопленном эрлифте иловой смеси выражался в виде интенсивности циркуляции $I_{ц}$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Под интенсивностью циркуляции подразумевается отношение производительности затопленного эрлифта к поперечному сечению нисходящего потока аэротенка на уровне нижней кромки наклонного козырька (формула 5):

$$I_{ц} = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot Q_a}{L \cdot B_j}, \quad (5)$$

где Q_n — расход осветлённой жидкости, вытекающей из аэротенка осветлителя, мл/мин ; Q_a — производительность затопленного эрлифта, л/мин ; B_c — ширина

осветлителя, измеренная на уровне нижней кромки наклонного козырька, мм .

Опыты производились с использованием активного ила, отобранного из аэротенка-вытеснителя канализационной очистной станции г. Макеевки. Концентрация взвешенных веществ в иловой смеси составляла около 5,5 г/л, иловый индекс — $90 \div 110 \text{ см}^3/\text{г}$.

Экспериментальным путём находилась такая максимальная гидравлическая нагрузка на осветлитель, при которой граница между зоной осветления (взвешенный слой) и зоной отстаивания (защитный слой) в установившемся состоянии не превышает критического уровня. Критическим уровнем считалось такое положение поверхности илоразделения, при котором она не нарушается в результате всасывания осветлённой жидкости в отводящую трубку. Максимальная гидравлическая нагрузка на осветлитель в обеих исследуемых моделях аэротенка-осветлителя определялась при различных значениях подачи воздуха в аэрационную систему.

В таблице 2 приведены значения интенсивностей циркуляции $I_{ц}$ иловой смеси в аэротенке и значения соответствующих им максимальных допустимых гидравлических нагрузок q_r , полученные при испытании геометрически подобных моделей аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации. Точки, построенные по данным таблицы 2, и проведённые по ним кривые представлены на рисунке 3.

Таблица 2
Результаты экспериментального исследования

| Модель 1 | | Модель 2 | |
|--|--|--|--|
| $I_{ц}$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ | q_r , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ | $I_{ц}$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ | q_r , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ |
| 159 | 1,46 | 135 | 1,78 |
| 186 | 1,07 | 150 | 1,66 |
| 190 | 1,09 | 168 | 1,50 |
| 195 | 1,34 | 198 | 0,98 |
| 243 | 0,64 | 204 | 1,11 |
| 277 | 0,68 | 229 | 0,75 |
| 279 | 0,50 | 250 | 0,69 |
| 313 | 0,52 | 275 | 0,68 |
| 423 | 0,37 | 300 | 0,59 |

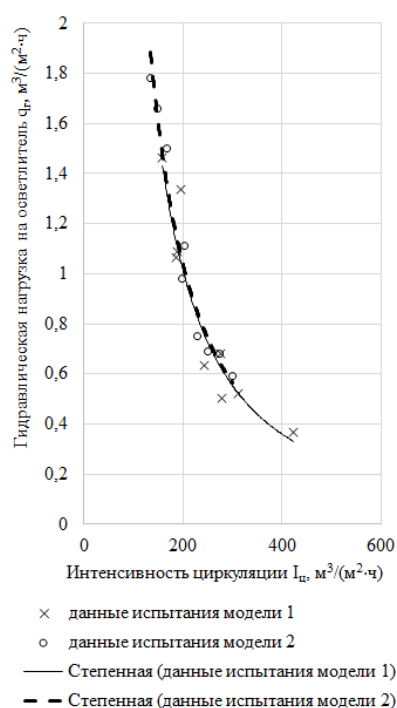


Рисунок 3 Результаты экспериментального исследования

Как видно из рисунка 3, графики, характеризующие зависимости максимальной гидравлической нагрузки от интенсивности циркуляции в модели 1 и модели 2, практически идентичны. Совпадение результатов экспериментов, проведённых на двух геометрически подобных моделях аэротенка-осветлителя, указывает на отсутствие значимости масштаба сооружения при определении его гидродинамических параметров.

Выводы и направление дальнейших исследований. В ходе экспериментальных исследований выяснилось, что гидродинамические параметры, требуемые для работы взвешенного слоя в аэротенке-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации, не зависят от величины сооружения. При осуществлении моделирования необходимым и достаточным является соблюдение геометрического подобия проектируемого натурного сооружения и исследованной лабораторной модели.

Библиографический список

1. Нездойминов, В. И. Аэротенк-отстойник с обновляющимся взвешенным слоем [Электронный ресурс] / В. И. Нездойминов, Д. В. Заворотный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Инженерные системы и техногенная безопасность. — 2016. — № 5 (121). — С. 15–19. — Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=30039829> (24.05.18).
2. Нездойминов, В. И. Исследование допустимой подачи затопленной эрлифтной системы аэрации в аэротенке-осветлителе [Электронный ресурс] / В. И. Нездойминов, Д. В. Заворотный, В. С. Рожков // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. — 2017. — № 3 (125). — С. 80–85. — Режим доступа : https://elibrary.ru/download/elibrary_30317130_57901437.pdf (4.12.17).
3. Нездойминов, В. И. Процессы осветления иловой смеси во взвешенном слое в сооружениях с эрлифтной системой аэрации [Текст] / В. И. Нездойминов, Д. В. Заворотный, В. С. Рожков // Технологии очистки воды «ТЕХНОВОД-2017» : материалы X юбилейной междунар. науч.-практич. конф. — Новочеркасск : Лик, 2017. — С. 268–272.
4. Нездоймінов, В. І. Математичний опис основних факторів, що впливають на формування зваженого шару осаду в муловідділювачі [Електронний ресурс] / В. І. Нездоймінов, В. І. Зятіна, В. С. Рожков, В. І. Лесной // Сучасне промислове та цивільне будівництво. — 2016. — Т. 12, № 2 — С. 51–58. — Режим доступа : http://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2016-2/01_nezdoyminov_zyatina_rozhkov_lesnoy.pdf (24.05.18).
5. Малаханов, В. В. Гидравлическое исследование нижнего бьефа водотранспортного гидроузла на аэродинамической модели [Электронный ресурс] / В. В. Малаханов // Вестник МГСУ — 2014. — № 2. — С. 153–163. — Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21225883> (25.05.2018).
6. Нездойминов, В. И. Гидродинамическая модель работы аэротенка с затопленной эрлифтной системой аэрации [Текст] / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков // Коммунальное хозяйство городов. — 2010. — № 93. — С. 353–358.

© Заворотный Д. В.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ВВиОВР ДонНАСА Нездойминовым В. И.,
д.т.н., проф. каф. ГиПС ИСА и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля Дроздом Г. Я.*

Статья поступила в редакцию 29.05.18.

Заворотний Д. В. (ДонНАБА, м. Макіївка, ДНР)

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЮВАННЯ
АЕРОТЕНКІВ-ОСВІТЛЮВАЧІВ З ЗАТОПЛЕНОЮ ЕРЛІФТНОЮ СИСТЕМОЮ
АЕРАЦІЇ**

Наведено результати експериментальних досліджень геометрично подібних моделей аеротенка-освітлювача з затопленою ерліфтною системою аерації. На підставі отриманих даних доведено, що визначення максимальних припустимих швидкостей плину потоків у виробничому аеротенку-освітлювачі з затопленою ерліфтною системою аерації, який проектується, слід виконувати із дотриманням тільки геометричної подібності.

Ключові слова: аеротенк-освітлювач, завислий шар, гідравлічне навантаження, подібність, автотомодельність, активний мул, аеротенк-відстійник, муловіділення.

Zavorotnyi D. V. (DonNABA, Makeyevka, DPR)

**EXPERIMENTAL DETERMINING THE PARAMETERS FOR DESIGNING THE AIR TANK-
CLARIFIERS WITH SUBMERGED AIRLIFT AERATION SYSTEM**

There have been given the research results on geometrically similar models of the air tank-clarifiers with submerged airlift aeration system. Based on the obtained results there has been proved that determination of maximum allowable flow speeds in the designed industrial air tank-clarifiers with submerged airlift aeration system should be done observing only the geometrical similarity.

Key words: air tank-clarifier, suspended layer, hydraulic load, similarity, automatic modelling, active sludge, air tank-sump, desilting.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ
И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**МАШИНОБУДУВАННЯ
ТА МАШИНОЗНАВСТВО**

**MECHANICAL ENGINEERING
AND MACHINE SCIENCE**

УДК 669.184

д.т.н. Еронько С. П.,
к.т.н. Ошовская Е. В.,
Стародубцев Б. И.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ОТСЕЧКИ ШЛАКА ПРИ ВЫПУСКЕ СТАЛИ ЧЕРЕЗ ГОРЛОВИНУ КОНВЕРТЕРА

Приведена методика силового расчёта рычажного механизма системы газодинамической отсечки конечного шлака при выпуске стали из кислородного конвертера с двумя осями вращения, позволяющая определить при заданных параметрах структурных элементов массу контргрузов, обеспечивающих автоматическое возвращение системы в исходное положение после завершения слива металла из плавильного агрегата в разливочный ковш. Расхождение между расчётными и экспериментально определёнными значениями суммарной массы контргрузов составило 5–10 %.

Ключевые слова: газодинамическая отсечка, кислородный конвертер, конечный шлак, газораспределительная камера, рычажный механизм, контргруз.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Отсечка конечного технологического шлака при выплавке стали в кислородных конвертерах является обязательной операцией, осуществляемой с целью устранения действия ряда негативных факторов, связанных с попаданием в разливочный ковш в значительном количестве агрессивного шлакового расплава (интенсивный износ огнеупорной футеровки, повышенный угар дорогостоящих раскислителей и лигатур, рефосфорация металла) [1].

Постановка задачи. Для удержания шлака в полости кислородного конвертера во время слива стали в разливочный ковш в настоящее время применяют различное специальное оборудование в зависимости от варианта реализуемого конвертерного процесса. Так, в конвертерах, имеющих в своей верхней части сталевыпускной канал, для его запираания в конечной стадии слива металла используют закреплённые на корпусе плавильного агрегата скользящие или поворотные затворы [2, 3], стопорные механизмы с пробками [4], а также элементы поплавкового типа, вводимые в ванну конвертера с помощью рядом с ним стоящего манипулято-

ра [5]. В конвертерах, конструкция которых предполагает слив продуктов плавки через горловину, указанные способы отсечки конечного шлака по известной причине не могут применяться. В связи с этим при создании плавильного агрегата, предназначенного для переработки некачественной шихты и металлосодержащих отходов, у которого отсутствует сталевыпускной канал, требуется принятие нового технического решения, позволяющего обеспечить в автоматическом режиме бесшлаковый слив металла через горловину в разливочный ковш [6].

Изложение материала и его результаты. Сотрудниками кафедры «Механическое оборудование заводов чёрной металлургии им. проф. Седуша В. Я.» Донецкого национального технического университета в результате исследований, проводимых с 2010 года, предложена новая система газодинамической отсечки конечного конвертерного шлака [7, 8], конструктивная схема которой показана на рисунке 1.

В состав системы входит два жёстко взаимосвязанных между собой коромысла 11 и 21, закреплённые с возможностью поворота на горизонтальном валу 13, установленном в подшипниковых опорах 12

и 20 перпендикулярно вертикальной плоскости, в которой лежит продольная ось симметрии корпуса конвертера. При этом коромысла снабжены направляющими С-образного сечения 8 и 22 с установленными в них роликами 5, имеющими возможность вращения на торцевых частях цилиндрической газораспределительной камеры 9, в корпусе которой выполнены щелевые отверстия 10. Сам корпус жёстко связан с одним концом газоподводящей трубы, другим концом закреплённой в шарнирной опоре 1 и посредством трубопровода 23 соединённой с запорным краном 19, размещённым на хвостовике горизонтального вала. При этом на задних концах коромысел имеются контргрузы 14 и 16, опирающиеся своей нижней частью на пружинные демпферы 17. На передних концах направляющих С-образного сечения посредством осей 2 и 6 закреплены рычаги 3 и 7. Конструкция узла крепления рычагов обеспечивает их жёсткую связь при силовом воздействии на них сверху и возможность относительного поворота на осях 2 и 6 при воздействии снизу.

Принцип работы в автоматическом режиме предложенной системы газодинамической системы следующий. После подачи сталевазной тележкой 3 разливочного ковша к плавильному агрегату для слива из него жидкой стали (рис. 2) корпус кислородного конвертера плавно поворачивают в вертикальной плоскости на цапфах в подшипниковых опорах с помощью электромеханического привода 11.

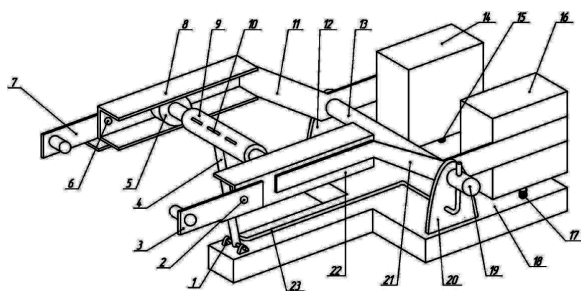


Рисунок 1 Общий вид системы газодинамической отсечки шлака

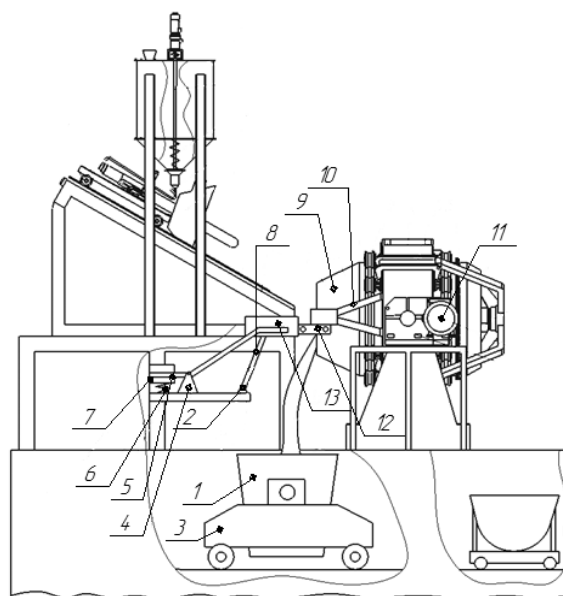


Рисунок 2 Относительное положение структурных механизмов конвертера во время выпуска стали с обеспечением газодинамической отсечки конечного шлака

В момент подхода зеркала расплава к устью горловины конвертера 9 упоры 10, неподвижно закреплённые на опорном кольце конвертера, входят в зацепление сверху с рычагами 12 и начинают их поворачивать вместе с коромыслами 5 и горизонтальным валом в подшипниковых опорах 4, преодолевая силу тяжести контргрузов 7. При повороте вала автоматически происходит открытие кинематически связанного с ним запорного крана, от которого по трубопроводу под избыточным давлением в полость цилиндрической распределительной камеры поступает газ (азот или воздух), истекающий из неё с большой скоростью через щелевые отверстия, образуя плоские газовые струи, направленные под определённым углом к зеркалу расплава. Под действием динамического напора этих струй происходит оттеснение от устья горловины в полость конвертера слоя шлака, плавающего на поверхности жидкого металла, который сливается в разливочный ковш. Во время дальнейшего поворота корпуса конвертера для полного слива металла упоры 10 будут воздействовать на рыча-

ги 12, поворачивая коромысла 5. Вместе с ними осуществляют поворот направляющие С-образного сечения 13, в результате чего цилиндрическая газораспределительная камера, посредством подающей трубы 8 связанная с шарнирной опорой 2, перемещается относительно направляющих на установленных роликах, закреплённых с возможностью вращения на её торцевых поверхностях. При этом автоматически обеспечивается заданное удаление щелевых отверстий газораспределительной камеры от зеркала металла в зоне устья горловины, что позволяет за счёт газодинамического напора удерживать шлаковый расплав в полости конвертера.

Проектированию опытного образца предложенной системы предшествовала разработка методики определения параметров её структурных элементов, при которых она должна не только чётко функционировать во время силового воздействия на её коромысла со стороны упоров, неподвижно закреплённых на корпусе агрегата, но и свободно возвращаться в исходное положение после завершения операции отсечки конечного технологического шлака.

Для выполнения силового расчёта рычажного механизма использовали принцип Даламбера, согласно которому подвижная система тел находится в каждый момент времени в равновесии под действием внешних сил, включая и силы инерции. Механизм разбили на две структурные группы (рис. 3). В состав последней группы (рис. 3, в) входят горизонтально расположенная газораспределительная камера, несущая на концах свободно вращающиеся ролики и жёстко связанная с верхним концом газоподводящей трубы, нижний конец которой установлен в шарнирной опоре, обеспечивающей ей поворот в вертикальной плоскости.

Во время возвращения системы в исходное положение на звенья рассматриваемой структурной группы действуют силы тяжести газораспределительной камеры с роликами и газоподводящей трубы, а также си-

лы сопротивления в роликовых и шарнирной опорах, вызванные силами реакций.

Выбираем систему координат для данной структурной группы, ориентируя направление оси y_1 перпендикулярно вертикальной плоскости симметрии роликовых опор газораспределительной камеры. От оси x_1 ведётся отсчёт угла поворота газоподводящей трубы φ_1 . Предварительно следует найти координаты центра тяжести рассматриваемой структурной группы $C_1(x_{C1}, y_{C1}, z_{C1})$, в котором приложена суммарная сила тяжести:

$$G_{C1} = 2G_p + G_{зк} + G_{зм},$$

где G_p — сила тяжести роликовой опоры;

$G_{зк}$ — сила тяжести газораспределительной камеры;

$G_{зм}$ — сила тяжести газоподводящей трубы.

Возникающие при повороте газоподводящей трубы с газораспределительной камерой вокруг оси y_1 с угловым ускорением ε_1 и угловой скоростью ω_1 касательная F_{It_1} и нормальная F_{In_1} силы инерции равны:

$$F_{It_1} = \frac{G_1}{g} \cdot a_{t_1}, \quad a_{t_1} = \varepsilon_1 \cdot r_{C_1},$$

$$F_{In_1} = \frac{G_1}{g} \cdot \varepsilon_1 \cdot r_{C_1};$$

$$F_{In_1} = \frac{G_1}{g} \cdot a_{n_1}, \quad a_{n_1} = \omega_1^2 \cdot r_{C_1},$$

$$F_{In_1} = \frac{G_1}{g} \cdot \omega_1^2 \cdot r_{C_1}.$$

где r_{C_1} — расстояние от оси вращения до центра тяжести системы C_1 ,

$$r_{C_1} = \sqrt{x_{C_1}^2 + y_{C_1}^2}.$$

Положение центра тяжести C_1 в плоскости $O_1X_1Z_1$ выражается через угол φ_1 :

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{z_{C_1}}{x_{C_1}}; \quad \sin \varphi_1 = \frac{z_{C_1}}{r_{C_1}}; \quad \cos \varphi_1 = \frac{x_{C_1}}{r_{C_1}}.$$

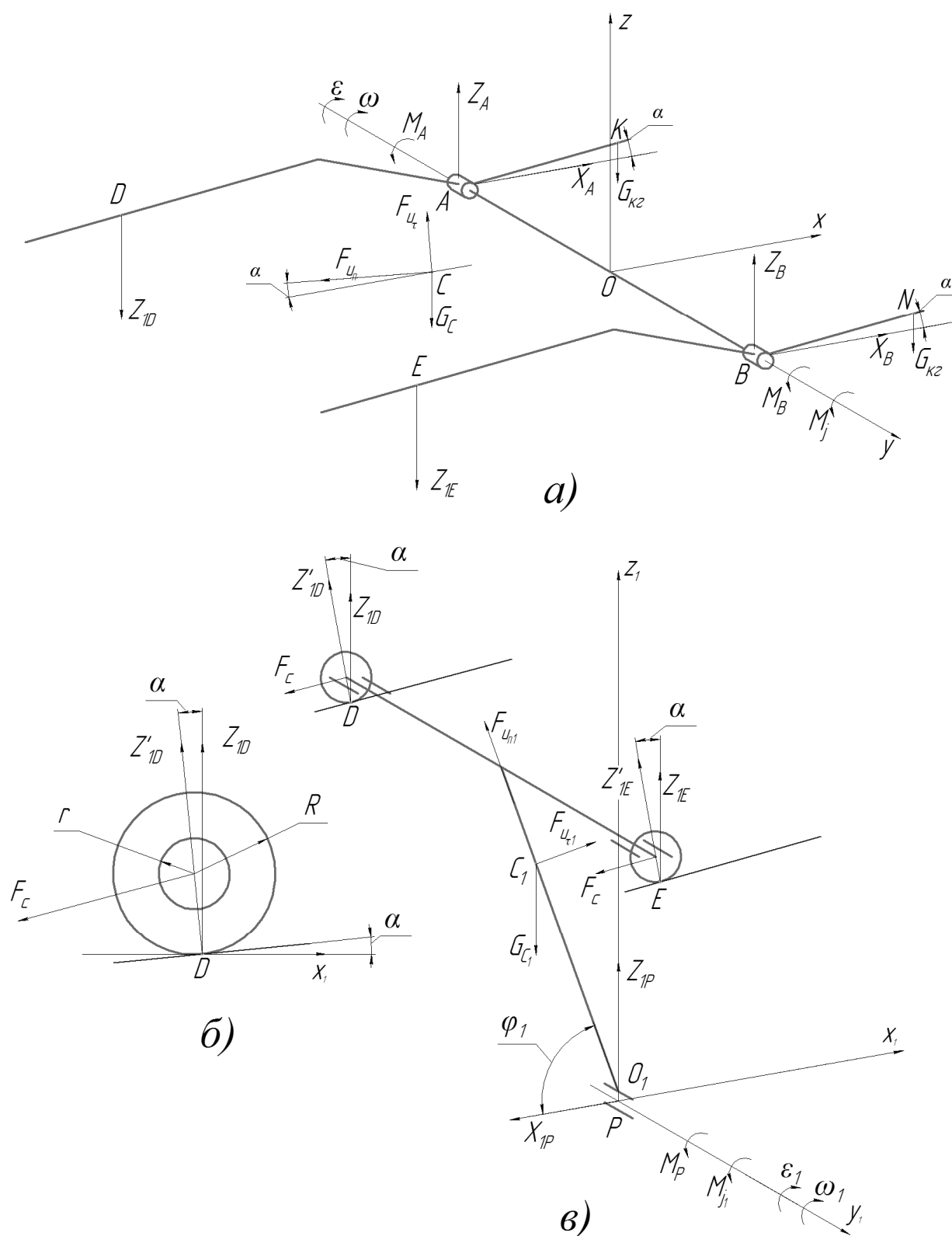


Рисунок 3 Расчётная схема механизма газодинамической отсечки шлака

Силы инерции F_{It_1} и F_{Im_1} приложены в точке L_1 , положение которой определяется по формуле:

$$L_1 C_1 = \frac{\rho_{C_1}^2}{r_{C_1}},$$

где ρ_{C_1} — радиус инерции системы относительно оси, проходящей через центр тяжести C_1 параллельно оси вращения.

Переносим силы F_{It_1} и F_{Im_1} в точку C_1 . Силу F_{Im_1} переносим по линии действия. Силу F_{It_1} переносим параллельно в точку C_1 с добавлением пары, момент которой равен:

$$M_{j_1} = F_{It_1} \cdot L_1 C_1 = \frac{G_1}{g} \cdot \rho_{C_1}^2 \cdot \varepsilon_1 = I_{C_1} \cdot \varepsilon_1,$$

где I_{C_1} — момент инерции поворотной структурной группы относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести C_1 параллельно оси y_1 ,

$$I_{C_1} = \frac{G_1}{g} \cdot \rho_{C_1}^2.$$

Момент M_{j_1} направлен в сторону, противоположную направлению вращения элементов структурной группы. Все силы инерции, действующие на поворотную группу, расположены в одной плоскости, перпендикулярной оси y_1 . На схеме обозначены: M_p — момент сопротивления, действующий в шарнирной опоре газоподводящей трубы; X_{1P} , Z_{1D} , Z_{1E} и Z_{1P} — соответствующие реакции в опорах D , E и P .

Учитывая симметричность рычажной системы относительно вертикальной плоскости $z_1 O_1 x_1$, принимаем $Z_{1D} = Z_{1E}$. При этом, в соответствии с рисунком 3,б, сила сопротивления движению ролика по С-образной направляющей равна:

$$F_c = Z_{1D} \cdot \left(\frac{\mu \cdot d + 2 \cdot k}{D} \right),$$

где μ — коэффициент трения цапф роликов;

k — коэффициент трения качения роликов;

d — диаметр цапф;

D — диаметр роликов.

Уравнения равновесия системы по законам статики имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \sum F_x &= -2 \cdot Z'_{1E} \cdot \sin \alpha - X_{1P} - \\ &- F_{u_{n1}} \cdot \cos \varphi_1 + F_{u_{\tau 1}} \cdot \sin \varphi_1 - \\ &- 2 \cdot F_c \cdot \cos \alpha = 0; \\ \sum F_z &= 2 \cdot Z'_{1E} \cdot \cos \alpha + F_{u_{n1}} \cdot \sin \varphi_1 + \\ &+ F_{u_{\tau 1}} \cdot \cos \varphi_1 - G_{C_1} + Z_{1P} = 0; \\ \sum M_y &= M_p + M_{j_1} + G_{C_1} \cdot x_{C_1} - \\ &- F_{u_{\tau 1}} \cdot O_1 C_1 - 2 Z_{1E} \cdot \cos \alpha \cdot x_E + \\ &+ 2 \cdot F_c \cdot \cos \alpha \cdot (z_D + R) + \\ &+ 2 \cdot F_c \cdot \sin \alpha \cdot x_D = 0. \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

где x_{C_1} , z_{C_1} , x_E , x_D , z_D — плечи сил.

В результате решения системы уравнений (I) находятся реакции в точках E , D , P .

При силовом расчёте второй группы, включающей С-образные направляющие и коромысла, связанные между собой валом, направление реакций в точках контакта E и D роликов с поверхностью направляющих изменяем на противоположное. Вместе с ними на элементы системы действуют сила тяжести контргрузов G_{k2} и направляющих с рычагами G_C , моменты M_A и M_B от сил трения в подшипниковых опорах вала A и B , вызванные силами реакций X_A , Z_A , X_B , Z_B в этих опорах.

В выбранной системе координат определяются координаты центра тяжести $C(x_C, y_C, z_C)$, в котором приложена сила тяжести рассматриваемой системы.

Аналогично при повороте направляющих с рычагами вокруг оси z с угловым ускорением ε и угловой скоростью ω возникают касательная F_{u_τ} и нормальная F_{u_n} силы инерции, которые равны:

$$F_{u_\tau} = \frac{G_C}{g} \cdot a_\tau, \quad a_\tau = \varepsilon \cdot r_C, \quad F_{u_n} = \frac{G_C}{g} \cdot \varepsilon \cdot r_C;$$

$$F_{u_n} = \frac{G_C}{g} \cdot a_n, \quad a_n = \omega^2 \cdot r_C, \quad F_{u_n} = \frac{G_C}{g} \cdot \omega^2 \cdot r_C,$$

где r_C — расстояние от оси вращения до центра тяжести системы C ,

$$r_C = \sqrt{x_C^2 + z_C^2}.$$

Положение центра тяжести C выражается через угол α :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{z_C}{x_C}; \quad \sin \alpha = \frac{z_C}{r_C}; \quad \cos \alpha = \frac{x_C}{r_C}.$$

Момент добавляемой пары сил при переносе силы инерции F_{u_τ} в точку C равен:

$$M_j = F_{u_\tau} \cdot LC = I_C \cdot \varepsilon,$$

где I_C — момент инерции поворотной системы относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести C ,

$$I_C = \frac{G_C}{g} \cdot \rho_C^2.$$

Момент M_j направлен в сторону, противоположную направлению вращения элементов выделенной системы. Все силы инерции, действующие на поворотную систему, расположены в одной плоскости, перпендикулярной оси вращения направляющих y . Кроме того к системе приложены: M_A , M_B — моменты от сил трения в опорах A и B ; составляющие реакции в этих опорах X_A , X_B , Z_A , Z_B ; Z_{1E} , Z_{1D} — составляющие реакции в точках D и E , действующие со стороны элементов первой структурной группы.

Реакции в опорах A и B можно приравнять, т. к. рассматриваемая система симметрична. Это также относится и к реакциям в точках D и E :

$$X_A = X_B, Z_A = Z_B, \\ Z_{1E} = Z_{1D} = Z'_{1E} \cdot \cos \alpha.$$

Уравнения равновесия по законам статики имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \sum F_x &= 2 \cdot X_B - F_{u_n} \cdot \cos \alpha + \\ &+ F_{u_\tau} \cdot \sin \alpha = 0; \\ \sum F_z &= 2 \cdot Z_B - 2 \cdot G_{k2} - 2 \cdot Z_{1E} + \\ &+ F_{u_n} \cdot \sin \alpha + F_{u_\tau} \cdot \cos \alpha = 0; \\ \sum M_y &= M_B + M_A + M_j - 2 \cdot G_{k2} \cdot x_N + \\ &+ 2 \cdot Z_{1E} \cdot x_E - F_{u_\tau} \cdot OC = 0. \end{aligned} \right\} \text{(II)}$$

где x_N , x_E — плечи сил.

Моменты сил трения в опорах горизонтального вала:

$$M_A = M_B = \mu_1 \cdot R_1 \cdot \sqrt{X_B^2 + Z_B^2};$$

где R_1 — радиус опор A и B ;

μ_1 — коэффициент трения скольжения в опорах A и B .

Решая систему уравнений (II), определяют реакции опор A и B , а также массу контргрузов G_{k2} , закреплённых на концах коромысел для возвращения элементов системы газодинамической отсечки в исходное положение.

С целью проверки правильности технических решений, принятых при создании новой системы газодинамической отсечки конечного шлака, и оценки корректности полученных зависимостей для расчёта её конструктивных и силовых параметров изготовили в масштабе 1:10 действующий модельный комплекс, включавший исследуемый рычажный механизм и обслуживаемый им кислородный мини-конвертер (рис. 4). Предварительно с использованием измеренных геометрических параметров элементов модели рычажного механизма и их весовых характеристик по предложенной методике рассчитали минимальные значения суммарной силы тяжести контргрузов, достаточные для возвращения моделируемой системы в исходное положение при имитации с её использованием процесса отсечки конечного шлака. Затем опытным путём с помощью сменного комплекса грузов с известной массой, последовательно закрепляемых на задние концы коромысел, фиксировали момент начала поворота всей механической системы в обратном направле-

нии при прекращении силового воздействия на неё со стороны упоров, жёстко связанных с опорным кольцом модели конвертера.



Рисунок 4 Фото моделей кислородного конвертера с двумя осями вращения и системы газодинамической отсечки шлака

Выводы и направление дальнейших исследований. Полученные зависимости могут использоваться при расчёте и проектировании промышленных образцов исследуемой системы, направление дальнейшего исследования которой будет связано с оснащением газораспределительной камеры поворотными щелевыми соплами, имеющими возможность автоматического поддержания заданного угла атаки истекающих плоских газовых струй при изменении положения рычажного механизма относительно горловин конвертера.

Библиографический список

1. Бойченко, Б. М. Конвертерное производство стали : теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология [Текст] / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотский, П. С. Харлашин. — Днепропетровск : РВА «ДНЕПРО-ВАЛ», 2006. — 454 с.
2. Бесшлаковый выпуск плавки с помощью затвора выпускного отверстия ТАР 120 при производстве чистой стали [Текст] / У. Греф, А. Бергхофер, Г. Амсел и др. // *Сталь*. — 2005. — № 7. — С. 51–54.
3. Исследование и расчёт энергосиловых параметров системы поворотного затвора для отсечки шлака при выпуске стали из кислородного конвертера [Текст] / С. П. Еронько, Е. В. Ошовская, С. А. Бедарев и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2010. — № 3. — С. 102–106.
4. Энкер, Б. Новая стопорная система для шлака кислородно-конвертерного производства стали [Текст] / Б. Энкер, А. Пастер, Й. Швельбегер // *Металлургическое производство и технологии металлургических процессов*. — 2002. — № 5. — С. 12–20.
5. Howanski, William S. Optimizing B.O.F. Slag control through the application of refractory darts / William S. Howanski, T. Kalep, T. Swift // *AISTech Proceedings*. — 2006. — № 1. — P. 601–609.
6. Еронько, С. П. Перспективы использования и проблематика создания мини-агрегата для переработки некачественной шихты и металлосодержащих отходов [Текст] / С. П. Еронько, Н. А. Климович // *Чёрная металлургия : бюл. ин-та «Черметинформация»*. — 2016. — № 5. — С. 26–31.
7. Разработка автоматической системы газодинамической отсечки конечного шлака для конвертера с вращающимся корпусом [Текст] / С. П. Еронько, С. М. Горбатюк, Е. В. Ошовская и др. // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. — 2017. — Том 60. — № 11. — С. 863–869.
8. Пат. 2623934 Российская Федерация, МПК C21C 5/42. Кислородный конвертер для переработки чугуна и металлического лома с повышенным содержанием вредных примесей / С. П. Еронько, Н. А. Климович, С. М. Горбатюк // *Бюл. изобретений*. — 2017. — № 19.

© Еронько С. П.

© Ошовская Е. В.

© Стародубцев Б. И.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.,
д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Сидоровым В. А.

Статья поступила в редакцию 02.04.18.

д.т.н Єронько С. П., к.т.н. Ошовська О. В., Стародубцев Б. І. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР)

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ ГАЗОДИНАМІЧНОГО ВІДСІЧЕННЯ ШЛАКУ ПІД ЧАС ВИПУСКУ СТАЛІ ЧЕРЕЗ ГОРЛОВИНУ КОНВЕРТЕРА

Наведено методику силового розрахунку важільного механізму системи газодинамічного відсічення кінцевого шлаку під час випуску сталі з кисневого конвертера з двома осями обертання, що дозволяє визначити при заданих параметрах структурних елементів масу контрвантажів, які забезпечують автоматичне повернення системи в початковий стан після завершення зливу металу з плавильного агрегату в розливний ківш. Розбіжність між розрахунковими й експериментально визначеними значеннями сумарної маси контрвантажів склала 5–10 %.

Ключові слова: газодинамічне відсічення, кисневий конвертер, кінцевий шлак, газорозподільна камера, важільний механізм, контрвантаж.

Doctor of Tech. Sc. Eron'ko S. P., PhD Oshovskaya Ye. V, Starodubtsev B. I. (DonNTU, Donetsk, DPR)

CALCULATING THE PARAMETERS OF AUTOMATIC SYSTEM OF GAS DYNAMIC SLAG CUTOFF AT STEEL TAPING THROUGH THE VESSEL MOUTH

A technique for power calculating the linkage system of gas dynamic slag cutoff at steel tapping from the oxygen-blown vessel with two axis of rotation is given to determine under the set-up parameters of structural elements the mass of balance weight providing automatic resetting after metal is discharged from melting unit into a casting ladle. Divergence between calculated and experimentally defined values of total mass of balance weight is 5–10 %.

Key words: gas dynamic cutoff, oxygen-blown vessel, final slag, gas distribution chamber, linkage, balance weight.

УДК 621.73:06-52

ст. препод. Коваленко О. А.,
к.т.н. Куберский С. В.,
д.т.н. Новохатский А. М.,
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ СТОЙКОСТИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ШТАМПОВ

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния технологических параметров процесса упрочнения штампового инструмента на его стойкость. Предложены практические рекомендации, позволяющие повысить стойкость разделительных штампов.

Ключевые слова: разделительные штампы, напряжённно-деформированное состояние, пуансон, матрица, электроискровое легирование, упрочнение, шероховатость, износ, стойкость.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. В настоящее время достаточно актуальны вопросы, связанные с теоретическими и экспериментальными исследованиями, направленными на разработку эффективных методов, способствующих обеспечению надёжной и безопасной эксплуатации и продлению ресурса механизированного инструмента на всех стадиях его жизненного цикла.

Применительно к процессу листовой штамповки важной научно-практической задачей является расширение технологических возможностей оборудования и увеличение срока эксплуатации штампового инструмента. Решение отмеченных задач представляется возможным при условии проведения всесторонних теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку рекомендаций по совершенствованию технологии и оборудования, а также методов упрочнения режущих кромок разделительных штампов.

В ранее опубликованных работах [1–9] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, из которых следует, что к вопросу повышения стойкости штампов следует подходить комплексно, сочетая различные технологические и эксплуатационные факторы:

- зависящие от внешних воздействий, т. е. от нагрузок на рабочие части штампов;

- связанные с физико-механическими свойствами материала рабочих частей штампа (матрицы и пуансона);

- связанные с изнашивающей способностью штампуемого материала.

Постановка задачи. На основе экспериментальных и теоретических исследований разработать рекомендации по совершенствованию конструкции разделительных штампов применительно к конкретным технологическим процессам, а также рекомендации по совершенствованию методов и режимов упрочнения режущих кромок штампового инструмента.

Изложение материала и его результаты. Стойкость штампов во многом определяется напряжённно-деформированным состоянием (НДС) режущих поверхностей, которое изменяется под влиянием различных факторов, в том числе и в результате упрочнения штампового инструмента.

В данной работе для упрочнения штампового инструмента был выбран метод электроискрового легирования (ЭИЛ), с применением в качестве материала анода ванадия, который оказался наиболее эффективным по целому ряду технико-экономических показателей [1].

При таком способе упрочнения инструмента было отмечено снижение максимального значения показателя напряжённного состояния практически на 15 %. Кроме того, характер изменения значения по-

казателя напряжённого состояния на поверхности разделительного инструмента на разных участках различный, причём в непосредственной близости к вершине режущей кромки, на участке рабочей поверхности инструментов, наблюдается снижение показателя напряжённого состояния на 30...50 %, а на боковой поверхности инструментов его увеличение в поверхностном слое на 20 %. Однако при этом предел прочности материала поверхностного слоя возрастает на 30 %, что в целом указывает на улучшение условий работы инструмента [2].

Одной из основных характеристик качества упрочнённой поверхности является твёрдость самого слоя и областей, примыкающих к нему.

По результатам проведённых исследований было установлено, что величина микротвёрдости упрочнённого методом ЭИЛ слоя существенно отличается для разных значений шероховатости, которая, в свою очередь, зависит от сплошности слоя, его структуры и пористости.

Так, в результате экспериментальных исследований и оценки НДС инструмента с нанесённым упрочняющим покрытием на базе моделирования методом конечных элементов минимальные значения показателя напряжённого состояния ($K\sigma < 1$) на поверхности упрочнённого слоя соответствуют исходной шероховатости 0,7–0,9 мкм, что хорошо согласуется с другими характеристиками поверхностного слоя (такими как микротвёрдость, предел упругости и предел прочности, износостойкость) именно в указанном диапазоне исходной шероховатости.

Таким образом, на основании полученных результатов, можно утверждать, что при подготовке поверхности к упрочнению ванадием методом ЭИЛ для рабочих поверхностей пуансона и матрицы целесообразно рекомендовать обработку до значений шероховатости в диапазоне 0,7–0,9 мкм [3–5].

Известно, что для снижения технологических усилий при проведении операций вырубки и пробивки, а следовательно, и

для повышения стойкости разделительных штампов применяют штампы со скошенными режущими кромками пуансона или матрицы [6, 7]. Так, при вырубке деталей пуансон изготавливается плоским, а скос делается на матрице. При пробивке матрица изготавливается плоской, а скос делается на пуансоне. Высота и угол скоса выбираются в зависимости от толщины штампуемого материала [6].

Традиционно форма пуансона принимается согласно рисунку 1, а. При вырубке и пробивке толстых и высокопрочных металлов используют пуансоны со скошенными кромками для снижения усилий деформации (рис. 1, б, в). Недостатком таких форм пуансона является то, что при выполнении разделительных операций возможна деформация металла, которая приводит к упрочнению материала заготовки, а следовательно, к повышению напряжений.

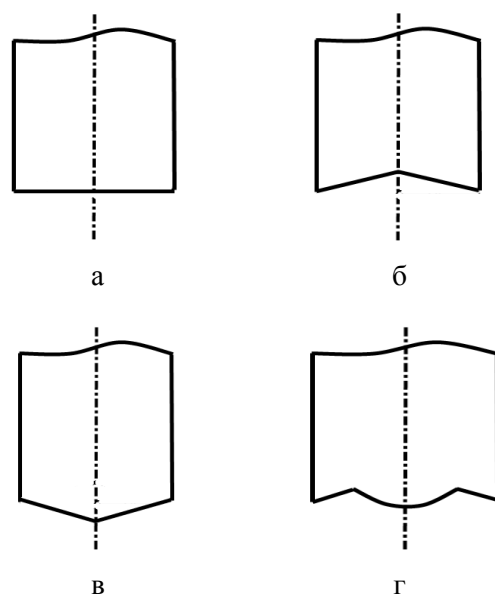


Рисунок 1 Различные конфигурации пуансона

В работе [8] представлена разработанная авторами конечно-элементная модель, позволяющая оценить распределение напряжений на режущих кромках пуансона при различных формах пуансона. Анализ результатов моделирования показал, что форма пуансона существенно влияет на

напряжённое состояние металла в зоне его контакта с пуансоном и на энергосиловые параметры процесса. При этом есть смысл предложить конфигурацию пуансона, представленную на рисунке 1,г.

Предложенная форма пуансона может использоваться как для вырубных, так и для пробивных штампов. Выбранная форма пуансона должна обеспечивать оптимальные значения и горизонтальных, и вертикальных напряжений при разделении металла, что позволяет уменьшить изнашивание рабочих поверхностей инструмента из-за перераспределения напряжений.

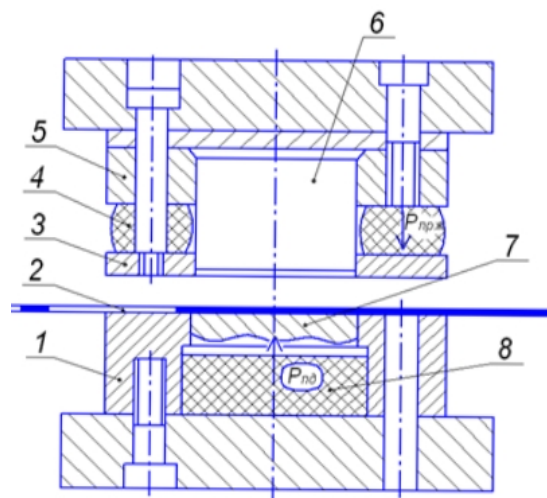
Таким образом, при вырубке и пробивке металла толщиной до 3 мм глубина скоса режущих кромок (Н) принимается равной $2t$ (где t — толщина деформируемого металла), угол скоса (φ) — до 5° . Центральная часть пуансона выступает относительно режущих кромок на 1 мм, что позволяет оптимально распределять напряжения на режущих кромках инструмента и по контактному пояску материала во время деформации.

Возможность применения предложенных методов повышения стойкости разделительных штампов можно рассмотреть на примере типового штампа для вырубки [7]. На рисунке 2 показан штамп для вырубки заготовок с верхним и нижним прижимом. Заготовка 2 располагается на матрице 1. Штамп имеет верхний прижим 3 и выталкиватель 7, которые работают под действием резиновых буферов 4 и 8 и обеспечивают дифференцированный прижим отхода и вырубаемой детали. Вырубка детали осуществляется пуансоном 6, который вмонтирован в держатель пуансона 5.

В данном штампе предлагается изменить форму пуансона и нанести упрочняющее покрытие на режущие кромки пуансона и матрицы (рис. 3).

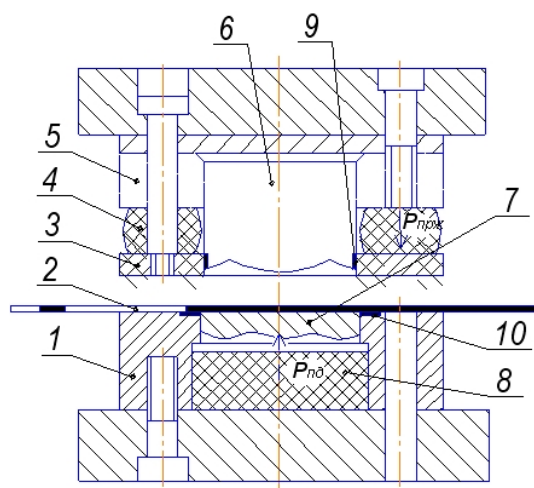
С целью снижения износа и повышения стойкости разделительных штампов поверхностное упрочнение рекомендовано проводить только на определённых участках пуансона и матрицы, подвергающихся

максимальному действию напряжений при выполнении технологических операций листовой штамповки [8] (рис. 4).



1 — матрица; 2 — заготовка; 3 — верхний прижим; 4 — резиновый буфер; 5 — держатель пуансона; 6 — пуансон; 7 — нижний выталкиватель; 8 — резиновый буфер

Рисунок 2 Штамп для вырубки заготовок с нижним и верхним прижимами



1 — матрица; 2 — заготовка; 3 — верхний прижим; 4 — резиновый буфер; 5 — держатель пуансона; 6 — пуансон; 7 — нижний выталкиватель; 8 — резиновый буфер; 9 — зона упрочнения пуансона; 10 — зона упрочнения матрицы

Рисунок 3 Штамп для вырубки заготовок с нижним и верхним прижимами после изменения формы пуансона и нанесения упрочняющего покрытия

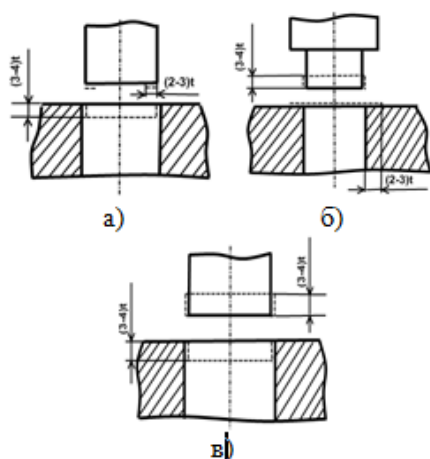


Рисунок 4 Зоны износа и рекомендуемого упрочнения рабочих частей вырубных (а и б) и пробивных (в) штампов

Так, при вырубке упрочнённый слой наносят на торцевую поверхность пуансона и боковую поверхность матрицы или на боковую поверхность пуансона и торцевую поверхность матрицы. Высота и ширина зоны износа пуансона и матрицы зависят от толщины деформируемого материала. Толщина материала принимается равной 1 мм.

Таким образом, в первом случае высота зоны износа матрицы составляет

$$(3-4) t = 3 \times 1 = 3 \text{ мм},$$

а ширина зоны износа пуансона:

$$(2-3) t = 2 \times 1 = 2 \text{ мм}.$$

В другом случае высота зоны износа пуансона составляет

$$(3-4) t = 3 \times 1 = 3 \text{ мм},$$

а ширина зоны износа матрицы:

$$(2-3) t = 2 \times 1 = 2 \text{ мм}.$$

Поэтому в предложенном штампе для вырубки заготовок с нижним и верхним прижимами (рис. 5) высота нанесения покрытия на боковую поверхность пуансона составляет

$$(3-4) t = 3 \times 1 = 3 \text{ мм},$$

ширина нанесения покрытия на торцевую поверхность матрицы:

$$(2-3) t = 2 \times 1 = 2 \text{ мм}.$$

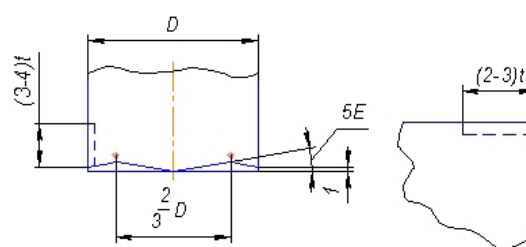


Рисунок 5 Геометрические параметры предложенной формы пуансона и размеры упрочнённых слоёв инструмента

Исходя из полученных экспериментальных данных [5, 9], толщина покрытия, выполненного ванадиевым электродом, составляет (при оптимальной исходной шероховатости поверхности 0,7–0,9 мкм):

- «белый» слой — 6–12 мкм;
- слой с высокой твёрдостью и прочностью — 10–30 мкм;
- переходная зона — 14–60 мкм.

Расход электрода на площадь 1 см² при времени нанесения покрытия 5 минут составляет в среднем 0,0083 г.

Выводы и направление дальнейших исследований. Для обеспечения высокой твёрдости получаемого методом ЭИЛ упрочнённого слоя и областей, примыкающих к нему, необходимо обрабатывать поверхности пуансона и матрицы перед легированием до значений шероховатости в диапазоне 0,7–0,9 мкм.

Предложена новая форма пуансона, обеспечивающая оптимальные значения горизонтальных и вертикальных напряжений при разделении металла, что способствует уменьшению износа рабочих поверхностей инструмента ввиду перераспределения возникающих напряжений.

Рекомендовано проводить поверхностное упрочнение участков пуансона и матрицы, на которых возникают максимальные напряжения, и учитывать при этом толщину деформируемого материала.

Предложена оптимальная толщина основных слоёв упрочняемого покрытия, выполненного методом ЭИЛ с использованием ванадиевого электрода при исходной шероховатости поверхности 0,7–0,9 мкм.

В ходе дальнейших исследований предполагается исследовать технологические параметры предложенных штампов, уп- рочнённых методом ЭИЛ в производст- венных условиях.

Библиографический список

1. Луценко, В. А. Выбор метода упрочнения разделительных штампов [Текст] / В. А. Луценко, О. А. Коваленко, П. В. Боровик // Сб. научн. тр. Донбасского государственного технического университета. — Алчевск : ДонГТУ, 2008. — Вып. 27. — С. 171–179.
2. Луценко, В. А. Анализ напряжённого состояния поверхности разделительного инструмента после упрочнения электроискровым легированием [Текст] / В. А. Луценко, О. А. Коваленко, П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. научн. тр. — Краматорск : ДГМА, 2011. — Вып. 1 (26). — С. 227–231.
3. Коваленко, О. А. Исследование влияния исходной шероховатости инструмента, упрочняемого электроискровым легированием, на износостойкость штампового инструмента [Текст] / Сб. научн. тр. Донбасского государственного технического университета. — Алчевск : ДонГТУ, 2011. — Вып. 35. — С. 228–234.
4. Коваленко, О. А. Анализ исходной шероховатости рабочей поверхности инструмента при упрочнении ванадием методом электроискрового легирования [Текст] / О. А. Коваленко, П. В. Боровик // Вестник Национального технического университета «ХПИ», серия «Новые решения в современных технологиях» : сб. научн. тр. — Харьков : НТУ «ХПИ», 2012. — Вып. 46 (952). — С. 66–71.
5. Боровик, П. В. Оценка механических свойств упрочнённого слоя для исследования напряжённо-деформированного состояния рабочей поверхности разделительных штампов [Текст] / П. В. Боровик, О. А. Коваленко // Обработка материалов давлением : сб. научн. тр. — Краматорск : ДГМА, 2011. — Вып. 4 (29). — С. 192–197.
6. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В. П. Романовский. — Л. : Машиностроение, 1979. — 516 с.
7. Рудман, Л. И. Справочник конструктора штампов [Текст] / Л. И. Рудман. — М. : Машиностроение, 1988. — 495 с.
8. Луценко, В. А. Конечно-элементное моделирование разделительных операций листовой штамповки [Текст] / В. А. Луценко, О. А. Коваленко, П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. научн. тр. — Краматорск : ДГМА, 2011. — Вып. 3 (24). — С. 15–19.
9. Ершов, В. М. Исследование процесса ванадирования стали У8А [Текст] / В. М. Ершов, О. А. Коваленко [Текст] // Сб. научн. тр. Донбасского государственного технического университета. — Алчевск : ДонГТУ, 2005. — Вып. 20. — С. 271–278.

© Коваленко О. А.

© Куберский С. В.

© Новохатский А. М.

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМДиМ ДонГТУ Денищенко П. Н., ст. мастером ОНРС ККЦ филиала № 12 ЗАО «Внеи́торгсервис» Максаевым Е. Н.

Статья поступила в редакцию 08.06.18.

ст. викл. Коваленко О. О., к.т.н., проф. Куберский С. В., проф., д.т.н. Новохатский О. М.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ РОЗДІЛОВИХ ШТАМПІВ

Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень впливу технологічних параметрів процесу зміцнення штампового інструменту на його стійкість. Запропоновано практичні рекомендації, що дозволяють підвищити стійкість розділових штамів.

Ключові слова: розділові штампви, напружено-деформований стан, пуансон, матриця, електроіскрове легування, зміцнення, шорсткість, знос, стійкість.

Senior Lecturer Kovalenko O. A., PhD, Prof. Kuberskiy S. V., Prof., Doctor of Tech. Sc. Novohatskiy A. M. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

DEVELOPMENT OF THE RECOMMENDATION FOR INCREASING THE STABILITY OF SHEARING DIES

The theoretical and experimental studies are presented for the results of influencing the processing conditions for strengthening the die tool on its stability. There have been given practical recommendations for increasing the stability of shearing dies.

Key words: shearing dies, stress-strain state, punch, matrix, electric discharge alloying, strengthening, roughness, wear, stability.

УДК 621.833.1

к.т.н. Грубка Р. М.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, grubka_roman@mail.ru)

РАЗВИТИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА СИНТЕЗА ПРОФИЛЯ ЗУБЬЕВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОСТРАНСТВЕННОМУ ЗУБЧАТОМУ СОЕДИНЕНИЮ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС

В статье изложены основные положения по развитию кинематического метода синтеза и исследования пространственных зубчатых соединений для цилиндрических зубчатых колёс. Данный подход позволяет существенно уменьшить трудоёмкость процесса профилирования зубьев с пространственной геометрией. На базе данного подхода получены обобщённые зависимости, описывающие геометрию боковой поверхности зубьев цилиндрических зубчатых колёс с пространственной модификацией, способных компенсировать погрешности изготовления, монтажа и перемещения, возникающие вследствие деформаций элементов зубчатых передач в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: кинематический метод синтеза, цилиндрическое зубчатое колесо, погрешности изготовления, погрешности монтажа, деформации.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Сложившаяся в настоящее время последовательность проектирования зубчатых передач заключается в создании таковых с локализованным контактом, способных компенсировать погрешности изготовления и деформации при работе [1]. В процессе проектирования зубчатых передач и технологических операций по обработке зубчатых венцов решаются задачи профилирования зубьев, определения закона движения одного из звеньев, синтез зацеплений с заданными или экстремальными свойствами, синтез станочных зацеплений и анализ нагруженности элементов режущих инструментов. Для решения задач теории зубчатых зацеплений применяются: дифференциально-геометрический метод нахождения огибающей к последовательным положениям движущейся поверхности [2, 3]; кинематический метод нахождения огибающей [2, 3, 4, 5]; метод огибания [6]. Одним из направлений методов поиска поверхностей зубьев, обладающих максимальной нагрузочной способностью, является их синтез, основанный на анализе пространства зацепления [1].

Работоспособность зубчатых передач зависит от вида и величины перемещений,

которые вызваны наличием погрешностей изготовления; погрешностей монтажа зубчатых венцов; погрешностей взаимного положения зубчатых венцов, возникающих в процессе эксплуатации вследствие деформации элементов зубчатых передач [7]. При проектировании зубчатых передач не всегда учитывают комплексное действие неизбежно имеющих погрешностей. Взаимодействия зубьев зубчатых колёс идеализированы и не учитывают реальные процессы, происходящие в передаче под действием факторов, возникающих при эксплуатации. Как следствие, в реальных условиях при наличии погрешностей и деформаций элементов зубчатых передач контакт зубьев далёк от линейного, а реальные эксплуатационные характеристики передач могут существенно отличаться от теоретических значений. Данные обстоятельства могут привести к существенному снижению нагрузочной способности передачи и снижению её долговечности вследствие локализации нагрузки или её неблагоприятному воздействию, что влечёт за собой повышение контактных и изгибных напряжений или приводит к необходимости закладывать значительные запасы прочности в элементы зубчатых передач.

Постановка задачи. Наличие погрешностей приводит к пространственному характеру контактирования зубьев в соединении и к необходимости синтеза пространственных геометрий боковой поверхности зубьев, близких к их естественному износу в процессе эксплуатации [8]. Переход к пространственному рассмотрению процессов, происходящих в реальном зацеплении с учётом возникающих технологических и эксплуатационных факторов, позволяет создавать зубчатые соединения, полностью соответствующие основным постулатам теории зацепления и обладающие функционально-ориентированными, а при необходимости и изменяющимися как по длине, так и по высоте зуба, эксплуатационными свойствами. Поэтому для решения задач синтеза и формообразования зубчатых венцов пространственно-модифицированных зубчатых колёс необходимо разрабатывать подходы по описанию боковых поверхностей зубьев и определению координат контактных точек как при эксплуатации зубчатых колёс, так и для определения точек мгновенного контакта режущего инструмента и заготовки в процессе обработки, что в конечном счёте определяет актуальность представленной работы.

Изложение материала и его результаты. Рассмотрим зубчатые соединения цилиндрических зубчатых колёс внешнего и внутреннего зацепления, в том числе соединения с внутренним зацеплением с передаточным отношением, равным единице, применяемым в зубчатых муфтах. Профиль зубьев колёс и обойм зубчатых муфт принимается эвольвентным с прямолинейной образующей. Боковые поверхности зубьев шестерни и зубчатой втулки выполняются с пространственной геометрией, способной компенсировать погрешности изготовления и монтажа, а также перемещения, вызванные деформациями, которые возникают в процессе эксплуатации элементов зубчатых соединений.

В соответствии с теоремой Виллиса в точке контакта двух профилей общая нормаль должна проходить через полюс зацепления, а

вектор относительной скорости точки контакта профиля зуба зубчатого колеса относительно точки контакта профиля зуба шестерни должен быть направлен вдоль общей касательной в точке контакта. Как показано в работе [3], величина относительной скорости в точке контакта профилей зубьев равняется произведению мгновенной угловой скорости на радиус вращения мгновенного вращательного движения. На основании чего в работе делается вывод о том, что мгновенный радиус поворота находится на общей нормали к профилям зубьев в мгновенной точке контакта. При этом с геометрической точки зрения радиус с центром в полюсе зацепления является наименьшим расстоянием среди множества расстояний от центра вращения до остальных точек профиля. И поэтому точка контакта может быть определена однозначно и точно.

В пространственном зацеплении, в отличие от плоского, контакт между зубьями осуществляется по линии, определённым образом расположенной в пространстве [9]. В пространственном соединении положение контактной точки в сечении плоскостью, параллельной базовому торцу колеса (или обоймы), не совпадающей с плоскостью симметрии зубчатого венца, изменяется как по высоте, так и по длине зуба. При этом положение полюса для зафиксированного второго зубчатого колеса не поменяется. Будет изменяться вместе с положением точки контакта по высоте и по длине зуба колеса направление нормали к контактной точке и, соответственно, величина радиуса мгновенного поворота из полюса зацепления. Учитывая, что в точке контакта двух сопряжённых профилей радиус мгновенного поворота принимает минимальное значение, можно определить координаты контактных точек рассматриваемой контактной линии при фиксированном угле поворота зубчатых колёс и при изменении координаты по длине зубчатого венца.

Последовательно просчитав положение контактных линий для разных углов поворота, можно определить геометрию боко-

вой поверхности зуба шестерни, сопряжённой с исходным зубчатым колесом, при наличии погрешностей изготовления, монтажа и перемещений, вызванных деформациями элементов зубчатых передач, которые возникают в процессе эксплуатации.

$$R_{PE}^2 = (x_2(\varphi_2) \cos \phi_2 + y_2(\varphi_2) \sin \phi_2)^2 + (-x_2(\varphi_2) \sin \phi_2 + y_2(\varphi_2) \cos \phi_2 \pm R_2)^2, \quad (1)$$

где R_{PE} — мгновенный радиус поворота из полюса зацепления в точку контакта двух сопряжённых профилей;

$x_2(\varphi_2)$, $y_2(\varphi_2)$ — координаты точки контакта на боковой поверхности зуба зубчатого колеса;

φ_2 — угол развёрнутости эвольвенты зубчатого колеса;

ϕ_2 — угла поворота зубчатого колеса;

R_2 — радиус делительной окружности зубчатого колеса.

Величина радиуса мгновенного поворота из полюса зацепления к контактной точке для рассматриваемого положения двух сопряжённых профилей определится из выражения (рис. 1):

Если задаваться величиной угла поворота зубчатого колеса ϕ_2 , то функция радиуса является функцией угла развёрнутости эвольвенты φ_2 .

Найдём наименьшее значение радиуса мгновенного поворота, продифференцировав и приравняв полученное выражение к нулю. Возьмём первую производную для выражения (1) по углу развёрнутости эвольвенты φ_2 . Выполнив преобразования и упростив выражение, получим:

– для внешнего зацепления:

$$\begin{aligned} \frac{dR_{PE}^2}{d\varphi_2} = & \left[\frac{x_2(\varphi_2) \sin \phi_2}{R_2} (1 + (\cos \phi_2)^2) + \frac{y_2(\varphi_2) \cos \phi_2}{R_2} (\sin \phi_2 - 1) - 1 \right] \sin \phi_2 \frac{dx_2(\varphi_2)}{d\varphi_2} + \\ & + \left[\frac{y_2(\varphi_2)}{R_2} + \cos \phi_2 + \frac{x_2(\varphi_2) \cos \phi_2 \sin \phi_2}{R_2} (\sin \phi_2 - 1) \right] \frac{dy_2(\varphi_2)}{d\varphi_2} = 0; \end{aligned} \quad (2)$$

– для внутреннего зацепления:

$$\begin{aligned} \frac{dR_{PE}^2}{d\varphi_2} = & \left[\frac{x_2(\varphi_2) \sin \phi_2}{R_2} (1 + (\cos \phi_2)^2) + \frac{y_2(\varphi_2) \cos \phi_2}{R_2} (\sin \phi_2 - 1) - 1 \right] \sin \phi_2 \frac{dx_2(\varphi_2)}{d\varphi_2} + \\ & + \left[\frac{y_2(\varphi_2)}{R_2} - \cos \phi_2 + \frac{x_2(\varphi_2) \cos \phi_2 \sin \phi_2}{R_2} (\sin \phi_2 - 1) \right] \frac{dy_2(\varphi_2)}{d\varphi_2} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

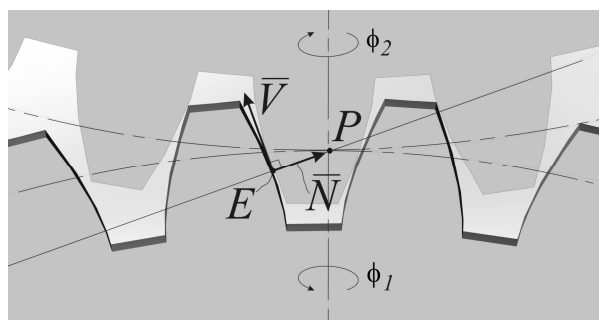


Рисунок 1 Мгновенный радиус поворота для пространственного соединения цилиндрических зубчатых колёс

Используя обобщённые зависимости для пространственного соединения цилиндрических зубчатых колёс, учитывающие наличие погрешностей и деформаций элементов передач [8], и задаваясь видом линии (для пространственных соединений поверхностью) зацепления, описываемой, например, линейной зависимостью вида $y_1 = R_1 + tg \alpha \cdot x_1$, получим обобщённую систему уравнений, которая позволяет определять параметры контактирования и координаты контактных точек в соединении двух цилиндрических колёс:

– для внешнего зацепления:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= (m'_{11} \cos \phi_2 - m'_{12} \sin \phi_2)x_2 + (m'_{11} \sin \phi_2 + m'_{12} \cos \phi_2)y_2 + m'_{13}z_2 + \\ &+ R_2 m'_{12} + m'_{14}; \\ y_1 &= (m'_{21} \cos \phi_2 - m'_{22} \sin \phi_2)x_2 + (m'_{21} \sin \phi_2 + m'_{22} \cos \phi_2)y_2 + m'_{23}z_2 + \\ &+ R_2 m'_{22} + m'_{24}; \\ z_1 &= (m'_{31} \cos \phi_2 - m'_{32} \sin \phi_2)x_2 + (m'_{31} \sin \phi_2 + m'_{32} \cos \phi_2)y_2 + m'_{33}z_2 + \\ &+ R_2 m'_{32} + m'_{34}; \\ y_1 &= R_1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot x_1; \\ \left[x_2(\phi_2) \sin \phi_2 (1 + (\cos \phi_2)^2) + y_2(\phi_2) \cos \phi_2 (\sin \phi_2 - 1) - R_2 \right] \sin \phi_2 \frac{dx_2(\phi_2)}{d\phi_2} + \\ &+ [y_2(\phi_2) + \cos \phi_2 + x_2(\phi_2) \cos \phi_2 \sin \phi_2 (\sin \phi_2 - 1)] \frac{dy_2(\phi_2)}{d\phi_2} = 0; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

- для внутреннего зацепления:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= (m'_{11} \cos \phi_2 - m'_{12} \sin \phi_2)x_2 + (m'_{11} \sin \phi_2 + m'_{12} \cos \phi_2)y_2 + m'_{13}z_2 - \\ &- R_2 m'_{12} + m'_{14}; \\ y_1 &= (m'_{21} \cos \phi_2 - m'_{22} \sin \phi_2)x_2 + (m'_{21} \sin \phi_2 + m'_{22} \cos \phi_2)y_2 + m'_{23}z_2 - \\ &- R_2 m'_{22} + m'_{24}; \\ z_1 &= (m'_{31} \cos \phi_2 - m'_{32} \sin \phi_2)x_2 + (m'_{31} \sin \phi_2 + m'_{32} \cos \phi_2)y_2 + m'_{33}z_2 - \\ &- R_2 m'_{32} + m'_{34}; \\ y_1 &= R_1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot x_1; \\ \left[x_2(\phi_2) \sin \phi_2 (1 + (\cos \phi_2)^2) + y_2(\phi_2) \cos \phi_2 (\sin \phi_2 - 1) \right] \sin \phi_2 \frac{dx_2(\phi_2)}{d\phi_2} + \\ &+ [y_2(\phi_2) - R_2 \cos \phi_2 + x_2(\phi_2) \cos \phi_2 \sin \phi_2 (\sin \phi_2 - 1)] \frac{dy_2(\phi_2)}{d\phi_2} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где x_1, y_1, z_1 — координаты контактной точки боковой поверхности зубьев шестерни;

m'_{ij} — коэффициенты в обобщённых уравнениях для пространственного соединения цилиндрических зубчатых колёс, учитывающие наличие погрешностей и деформаций элементов передач [8];

R_1 — радиус делительной окружности шестерни.

Выводы и направление дальнейших исследований. Описанный выше подход является развитием кинематического метода применительно к синтезу и исследо-

ванию пространственных зубчатых соединений на базе цилиндрических зубчатых колёс. Подход позволяет существенно уменьшить трудоёмкость процесса профилирования зубьев с пространственной геометрией. На базе данного подхода получены обобщённые зависимости, описывающие геометрию боковой поверхности зубьев цилиндрических зубчатых колёс с пространственной модификацией. Рассматриваемые зубчатые колёса способны компенсировать погрешности изготовления, монтажа и перемещения, возникающие вследствие деформаций элементов

зубчатых передач в процессе эксплуатации. Результаты, представленные в работе, могут быть использованы при расчётах

параметров процессов формообразования зубчатых венцов с пространственной геометрией боковой поверхности зубьев.

Библиографический список

1. Баби́чев, Д. Т. Развитие теории зацеплений и формообразования поверхностей на основе новых геометро-кинематических представлений [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.18 / Баби́чев Дми́трий Ти́хонович ; Тюменский государственный нефтегазовый ун-т. — Тюмень, 2005. — 421 с.
2. Радзевич, С. П. Кратко о кинематическом методе и об истории уравнения контакта в форме $nV=0$ [Текст] / С. П. Радзевич // Теория Механизмов и Машин. — 2010. — № 1. Том 8. — С. 42–51.
3. Литви́няк, Я. М. Доповнення до кінематичного способу синтезу профілю зубців площинного зубчастого зачеплення [Текст] / Я. М. Литви́няк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. — Львів, 2014. — № 786. — С. 93–98.
4. Кривошея, А. В. Особенности прямого и обратного формообразования эвольвентных цилиндрических зубчатых колёс с модифицированным профилем у вершины зуба [Текст] / А. В. Кривошея, В. Е. Мельник, Ю. М. Данильченко, Д. Т. Баби́чев, М. Г. Сторчак // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Тематич. вып. : Проблемы механического привода. — Харьков : НТУ «ХПИ», 2012. — № 36. — С. 82–90.
5. Ткачук, Н. Н. Кинематический метод и его реализация в приложениях геометрического синтеза зубчатых передач [Текст] / Н. Н. Ткачук, Н. А. Ткачук // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Тематич. вып. : Проблемы механического привода. — Харьков : НТУ «ХПИ», 2010. — № 27. — С. 182–197.
6. Елисеев, В. В. О построении сопряжённых профилей в пространственных зубчатых передачах [Текст] / В. В. Елисеев, А. В. Слоуц // Теория механизмов и машин. — 2004. — № 2. — С. 45–54.
7. Артемов, И. И. Система комплексного обеспечения точности зубчатых колёс в условиях автоматизированного производства [Текст] / И. И. Артемов // СТИН. — 1998. — № 6. — С. 8–13.
8. Грубка, Р. М. Обобщённые зависимости для пространственного соединения цилиндрических зубчатых колёс, учитывающие наличие погрешностей и деформаций элементов передач [Текст] / Р. М. Грубка // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : межд. сб. науч. тр. — Донецк : Донец. нац. техн. ун-т, 2018. — Вып. 3 (62). — С. 10–18.
9. Грубка, Р. М. Синтез структуры групповой пространственной геометрии зубьев втулок зубчатых муфт [Текст] / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : межд. сб. науч. тр. — Донецк : Донец. нац. техн. ун-т, 2004. — Вып. 27. — С. 71–75.

© Грубка Р. М.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МСМО ДонНТУ Гусевым В. В., к.т.н., доц. каф. ТМ ДонГТУ Зелинским А. Н.

Статья поступила в редакцию 01.06.18.

к.т.н. Грубка Р. М. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР, grubka_roman@mail.ru)

РОЗВИТОК КІНЕМАТИЧНОГО МЕТОДУ СИНТЕЗУ ПРОФІЛЮ ЗУБІВ СТОСОВНО ДО ПРОСТОРОВОГО ЗУБЧАСТОГО З'ЄДНАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

У статті викладено основні положення для розвитку кінематичного методу синтезу і дослідження просторових зубчастих з'єднань для циліндричних зубчастих коліс. Даний підхід дозво-

ляє істотно зменшити трудомісткість процесу профілювання зубів з просторовою геометрією. На базі даного підходу отримано узагальнені залежності, що описують геометрію бічної поверхні зубів циліндричних зубчастих коліс з просторовою модифікацією, які здатні компенсувати похибки виготовлення, монтажу і переміщення, що виникають внаслідок деформацій елементів зубчастих передач в процесі експлуатації.

Ключові слова: кінематичний метод синтезу, циліндричне зубчасте колесо, похибки виготовлення, похибки монтажу, деформації.

PhD Grubka R. M. (DonNTU, Donetsk, DPR)

DEVELOPMENT OF KINEMATIC METHOD OF TEETH PROFILE SYNTHESIS WITH REGARD TO SPATIAL SERRATED JOINT OF CYLINDRICAL GEARS

The paper explains the main propositions to develop kinematic method of tooth profile synthesis and studying the spatial serrated joint for cylindrical gears. This approach allows significantly reduce the labour-intensity of teeth shaping with spatial geometry. Based on this approach there have been obtained the generalized dependencies describing the geometry of teeth flanks of cylindrical gears with spatial modification enabling to negate manufacturing, mounting and movement errors emerged as a result of gear elements deformation during exploitation.

Key words: kinematic method of synthesis, cylindrical gear, manufacturing error, mounting error, deformations.

УДК 622.61

к.т.н. Арефьев Е. М.,
асп. Игнаткина Е. Л.,
(ДонНТУ, Донецк, ДНР)
преп. Кныш А. А.

(Донецкий политехнический колледж, Донецк, ДНР)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВИБРООЧИСТИТЕЛЯ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ С СИМИСТОРНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Установлены закономерности рабочего процесса виброочистителя с симисторной системой управления. Выбран диапазон рабочих частот вибровозбудителя на основании исследования его работы в резонансных и околорезонансных режимах. Определена необходимость использования системы управления с частотно-фазовой синхронизацией для стабильной работы очистителя, позволяющей обеспечить постоянную длительность импульсов при заданной рабочей частоте.

Ключевые слова: ленточный конвейер, симисторная система управления, вибровозбудитель, импульс, частота, конвейерная лента, виброочистка, вибрационный очиститель.

При транспортировании горной массы ленточными конвейерами налипший к ленте материал может привести к заштыбровке подконвейерного пространства и в конечном итоге — к простоям оборудования. Кроме этого, на очистку подконвейерного пространства приходится значительная доля небезопасного ручного труда.

Предотвратить образование просыпи в подконвейерном пространстве можно за счёт качественной очистки конвейерной ленты. Среди очистных устройств конвейерных лент наибольшее распространение получили контактные скребковые и ножевые очистители за счёт их более простой конструктивной реализации и обслуживания. В то же время вибрационные очистные устройства обладают рядом неоспоримых преимуществ: выведение рабочего органа очистителя из загрязнённой зоны, исключение взаимного износа рабочей обкладки конвейерной ленты и рабочего органа самого очистителя, обеспечение неизменной во времени степени очистки и т. д. В связи с этим представляет интерес дальнейшее исследование средств вибрационной очистки конвейерной ленты.

В работах [1–2] авторами приводятся конструкции виброочистных устройств различных типов без учёта особенностей

работы их привода. В работе [3] проведено исследование рабочего процесса виброочистителя с симисторной системой управления, в результате которого сделан вывод о том, что для обеспечения стабильной работы вибровозбудителя необходимо использовать систему управления с импульсно-фазовой синхронизацией с питающей сетью. В доступных источниках отсутствуют экспериментальные данные о рабочем процессе таких очистителей.

Целью статьи является установление закономерностей рабочего процесса виброочистителя с симисторной системой управления.

Для экспериментальных исследований эффективности режимов работы виброочистителя конвейерной ленты был спроектирован и изготовлен стенд, общая конструктивная схема которого показана на рисунке 1.

Стенд состоит из виброочистителя, установленного на действующей модели конвейера (масштабный фактор 1:2,65). Виброочиститель включает в себя шарнирно закреплённую на стойке 1 и подвешенную на пружинах 2 раму 3, на которой установлены роликовый рабочий орган 4 и якорь электромагнита 5. Якорь притягивается к ярму электромагнита 7, частота работы которого регулируется при помощи

системы управления, включающей силовой коммутирующий элемент СКЭ, управляемый при помощи микропроцессорной системы управления МСУ, и выпрямительный мост. Рабочий орган очистителя взаимодействует с лентой 6, сообщая ей колебательные движения. При этом МСУ реализует требуемую рабочую частоту f и скважность T импульсов включения магнита. Получаемое на выходе СКЭ напря-

жение U_2 вследствие особенностей коммутации симистора (отключение только при переходе напряжения через ноль) имеет переменную длительность импульсов T_i и пауз (погрешность до 10 мс), что может приводить к нестабильной работе виброочистителя. Для стабилизации режима работы в состав МСУ вводился блок синхронизации начал импульсов с моментами перехода напряжения через ноль.

■ - места установки вибродатчиков

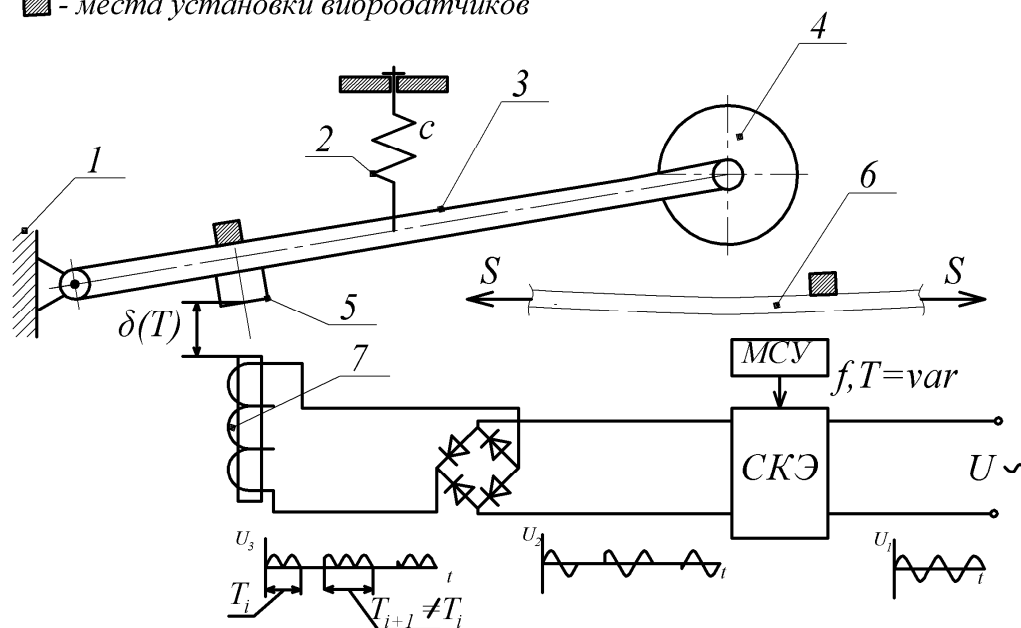


Рисунок 1 Схема стенда

Экспериментальные исследования проводились при вариации четырёх основных факторов: натяжение конвейерной ленты S ; рабочая частота вибровозбудителя f ; жёсткость пружин подвески виброочистителя c ; тип схемы управления вибровозбудителем.

Необходимые параметры физической модели конвейера определялись из условия её подобия конвейеру 2Л100У с резинотканевой конвейерной лентой ШР-1000-4-ТК-200-5-2 РБ ГОСТ 20-85, диапазон натяжения ленты в месте очистки для всей области применения конвейера — от 20 до 100 кН. Диапазон натяжений ленты, реализуемых на физической модели, составлял от 0,75 до 3,0 кН.

Конвейерная лента натягивалась винтовым натяжным устройством, тарировка ко-

торого осуществлялась путём пересчёта провеса ленты между роликоопорами, соответствующего определённому натяжению.

Выбор диапазона рабочих частот вибровозбудителя был основан на исследовании его работы в резонансных и околорезонансных режимах. Для реализуемых натяжений конвейерной ленты диапазон её собственных частот составлял от 10,8 до 21,9 Гц (первый тон). Жёсткость пружин подвески c формировалась набором пружин и изменялась дискретно, значения жёсткости составляли 12,5; 16; 27; 31 Н/мм. Тарировка пружин осуществлялась путём их нагружения эталонным грузом с последующим измерением деформации штангенциркулем ШЦ-1. Для соответствующих реализованных жёст-

костей были получены значения собственной частоты виброочистителя в пределах от 7,7 до 12,1 Гц. Диапазон изменения рабочей частоты f был принят от 5 до 20 Гц.

Ещё одним фактором эксперимента является тип схемы управления электромагнитным вибровозбудителем очистителя конвейерной ленты. Исследования проводились для двух типов схемы управления: автономные (не синхронизированные с питающей сетью) и схемы с частотно-фазовой синхронизацией с питающей сетью.

Зависимость силы, с которой притягивается якорь электромагнита к ярму, от зазора между ними при различных значениях тока в катушке электромагнита I_3 определялась экспериментально. При этом для каждого из значений тока измерялось усилие отрыва якоря от ярма P_m с помощью динамометра ДА-500 при различных значениях зазора в магнитной системе δ . Ток в катушке I_3 изменялся в пределах от 5,67 до 22,3 А вариацией напряжения на катушке электромагнита, зазор δ изменялся от 0,3 мм до 5 мм путём набора прокладок. Регрессионная зависимость силы электромагнита от тока и зазора между ярмом и якорем (рис. 2) имеет вид (доверительная вероятность 0,95 согласно критерию Фишера):

$$F_m(I_3, \delta) = -2,27 \cdot 10^3 - 220\delta + 11,6\delta^2 + 0,508I_3\delta + 643I_3 + 30,6I_3^2. \quad (1)$$

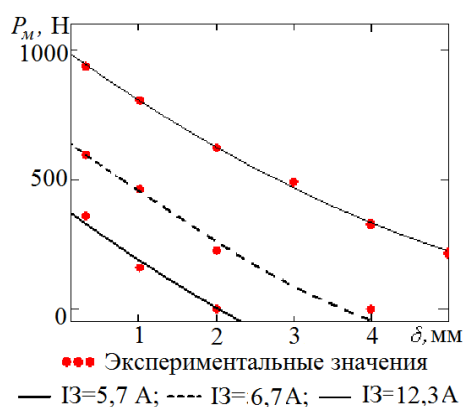


Рисунок 2 Аппроксимация экспериментальных значений силы, действующей на якорь электромагнита

Следует отметить, что при значениях тока I_3 свыше 12,3 А увеличения силы не наблюдалось, что объясняется насыщением магнитной системы. Следовательно, при значениях тока I_3 больше тока насыщения (для рассматриваемой катушки — 12,3 А) в выражение (1) необходимо подставлять значение тока насыщения. Если расчётные значения силы получаются отрицательными, то следует принимать $F_m = 0$.

В основу планирования эксперимента положен многофакторный эксперимент [4], при котором в опытах одновременно изменяются все входные величины. Планом эксперимента предусматривалось проведение 80 опытов (по 40 для каждого из двух типов системы управления вибровозбудителем: системы с частотно-фазовой синхронизацией с питающей сетью и автономной несинхронизированной системой управления).

В качестве измерительных и регистрирующих средств использовался виброанализатор «Топаз» и акселерометр РА-023.

Эксперимент проводился в соответствии со следующим алгоритмом. Сначала выбирался тип схемы управления электромагнитным вибровозбудителем очистителя конвейерной ленты. Затем оттарированным винтовым натяжным устройством создавалось натяжение конвейерной ленты. После чего путём комбинирования пружин задавалась необходимая жёсткость подвески очистителя. Следующим этапом при помощи микропроцессорной системы управления (МСУ) вибровозбудителем задавалась частота колебаний. В заключение записывались вибрационные перемещения и ускорения рабочего органа виброочистителя и ленты в установленном режиме работы очистителя.

Результаты эксперимента обрабатывались в пакете MS Excel. Строились временные графики виброперемещений рабочего органа очистителя и ленты, фиксировались максимальные значения амплитуды и виброускорений для каждого опыта.

На рисунке 3 представлены зависимости максимальных амплитуд конвейерной ленты от рабочей частоты виброочистите-

ля с частотно-фазовой синхронизацией. Анализ зависимостей позволяет сделать вывод, что максимальные амплитуды колебаний ленты составляют от 8,5 до 14,2 мм и соответствуют работе очистителя на собственных частотах, находящихся в диапазоне от 7,7 до 12,1 Гц.

При работе виброочистителя на собственной частоте ленты амплитуды её колебаний минимальны и составляют не более 3–5 мм (рис. 3). В некоторых режимах, при достаточно большой длительности импульса, наблюдались удары ярма о якорь электромагнита.

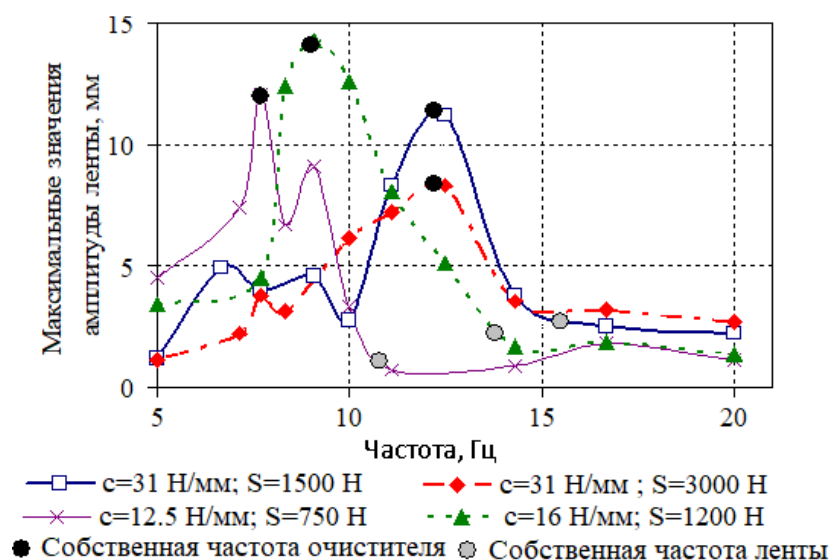


Рисунок 3 Максимальные значения амплитуды конвейерной ленты при работе вибровозбудителя по схеме с частотно-фазовой синхронизацией с питающей сетью

При экспериментальном исследовании работы вибрационного очистителя с автономной (не синхронизированной с питающей сетью) схемой управления электромагнитным вибровозбудителем из всего диапазона реализуемых частот стабильные колебания ленты наблюдались на рабочей частоте 14,29 Гц при всех значениях натяжения ленты и жёсткости пружин подвески. Это объясняется тем, что период возмущения $1/14,29=0,06997$ с кратен периоду выпрямленного напряжения $1/100=0,01$ с ($0,06998/0,01=6,997$ импульсов на период). Настройка МСУ обеспечивала поочередную выдачу 4-х импульсов и 3-х пауз. Из-за особенностей работы симистора (запирание при переходе через 0) и наличия дробной части в рассчитанном выше отношении через достаточно длительное время работы очистителя (1–2 мин) вибровозбудитель

переходил в режим работы с 4-мя паузами после 3–4 импульсов. В результате силовое воздействие на очиститель изменялось, и он переходил в другой режим работы. Чередование периодов работы не позволит обеспечить постоянство качества очистки ленты, следовательно, симисторная система без связи частоты импульсов, формируемых МСУ, с частотой сети не позволяет обеспечить регулируемый управляемый процесс работы вибрационного очистителя. Таким образом, для стабильной работы очистителя необходимо использование системы управления с частотно-фазовой синхронизацией, что позволит обеспечить постоянную длительность импульсов T_i при заданной рабочей частоте f .

Выводы и направление дальнейших исследований. Схема управления вибровозбудителем должна иметь частотно-

фазовую синхронизацию с питающей сетью, что позволит обеспечить стабильный режим работы очистителя. Максимальные амплитуды колебаний ленты соответствую-

ют работе виброочистителя на собственных частотах и для рассмотренной установки составляют 8,5–14,2 мм при частотах от 7 до 13 Гц.

Библиографический список

1. Будишевский, В. А. Сравнительный анализ технологий очистки конвейерных лент [Текст] / В. А. Будишевский, Е. М. Арефьев // Вести Донецкого горного института. — 2009. — № 1. — С. 8–11.
2. Расчёты и проектирование транспортных средств непрерывного действия [Текст] / А. И. Барышев, В. А. Будишевский, В. О. Гутаревич [и др.] ; под общ. ред. В. П. Кондрахина. — [2-е изд., перераб и доп.]. — Донецк : ДонНТУ, 2017. — 689 с.
3. Экспериментальное исследование рабочего процесса виброочистителя конвейерной ленты с симисторной системой управления [Текст] / В. А. Будишевский, Е. М. Арефьев, В. А. Яценко [и др.] // Наукові праці ДонНТУ. Серія : «Гірничо-електромеханічна». — 2010. — № 19 (175). — С. 47–54.
4. Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных [Текст] / Н. И. Сидняев. — Москва : Юрайт-Издат, 2012. — 399 с.

© Арефьев Е. М.
© Игнаткина Е. Л.
© Кныш А. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ГЭМиО ДонГТУ Корнеевым С. В., д.т.н., проф. каф. ГТиЛ ДонНТУ Гутаревичем В. О.

Статья поступила в редакцию 23.05.18.

к.т.н. Ареф'єв Є. М., Ігнаткіна Є. Л. (ДонНТУ, Донецьк, ДНР), Кныш А. А. (Донецкий политехнический колледж, Донецьк, ДНР)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІБРООЧИСНИКА КОНВЕЄРНОЇ СТРИЧКИ З СИМІСТОРНОЮ СИСТЕМОЮ УПРАВЛІННЯ

Встановлено закономірності робочого процесу віброочисника з симісторною системою управління. Обрано діапазон робочих частот вібробуджувача на підставі досліджень його роботи в резонансних і близькорезонансних режимах. Визначено необхідність використання системи управління з частотно-фазовою синхронізацією для стабільної роботи очисника, що дозволяє забезпечити постійну довжину імпульсів за заданої робочої частоти.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, симісторна система управління, вібробуджувач, імпульс, частота, конвеєрна стрічка, віброочистка, вібраційний очисник.

PhD Aref'iev E. M., Ignatkina E. L. (DonNTU, Donetsk, DPR), Knysh A. A. (Donetsk Polytechnic College, Donetsk, DPR)

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE OPERATING MODE EFFICIENCY OF VIBRATION CLEANER OF CONVEYOR BELT WITH TRIAC CONTROL SYSTEM

There have been determined the operating dependencies of vibration cleaner with triac control system. There has been adopted the range of operating frequency of vibration exciter because of its operating research in resonant and nearresonant mode. There has been determined the necessity of using the control system with phase-frequency locking for stable operation of cleaner allowing assured continual pulse duration at the set operating frequency.

Key words: belt conveyor, vibration cleaner, triac control system, vibration exciter, underconveyor area, pulse, frequency, locking.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ**

**ІНФОРМАЦІЙНІ
МАТЕРІАЛИ**

**INFORMATION
MATERIALS**

УДК 622(092)

Белозерцев В. Н.
(к.т.н., доцент, и. о. декана факультета экономики и финансов,
ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)
Ульяницкий В. Н.
(проф. кафедры машин металлургического комплекса,
ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ПАМЯТИ ГОРНОГО ИНЖЕНЕРА, УЧЁНОГО, ПЕДАГОГА



Р. А. Фрумкин (1936–2016 гг.),
 д.т.н., профессор

Вся творческая жизнь известного учёного, талантливого педагога и мудрого наставника студенческой молодёжи Фрумкина Рафаила Абрам-Берковича была неразрывно связана с Донбасским государственным техническим университетом (ДонГТУ).

Родился Рафаил Абрамович 3 июля 1936 г. в городе Смоленске Российской Федерации. После окончания средней школы поступил на обучение в Горловский горный техникум, который окончил в 1956 г. По распределению работал на шахтах Донбасса, занимая различные должности (от де-

сятника до помощника начальника участка). Желание получить высшее образование привело молодого целеустремлённого техника в Московский институт радиоэлектроники и горной электромеханики.

Отличные учёба и защита дипломного проекта стали основанием Государственной экзаменационной комиссии (1966 г.) рекомендовать горного инженера-физика Фрумкина Р. А. для учёбы в аспирантуре, которую он успешно окончил с досрочной защитой кандидатской диссертации.

С 1966 г. молодой кандидат наук впрягается в научную и педагогическую работу Коммунарского горно-металлургического института. Пристанищем Рафаилу Абрамовичу стала кафедра разработки пластовых месторождений, где он занимал должности первоначально старшего преподавателя, затем доцента кафедры, а в 1978 году был избран по конкурсу заведующим этой кафедрой. Успешная творческая деятельность Фрумкина Р. А. во главе кафедры в течение почти 40 лет позволила стать ей одной из лучших в ВУЗе по всем показателям.

В период с 1980 по 1990 гг. кафедра дважды признавалась лучшей среди горно-металлургических, машиностроительных и энергетических вузов Украины в части постановки научно-исследовательской работы студентов, одновременно занимая передовые позиции в ДонГТУ по учебной, методической и воспитательной работе.

За 20 лет (1969–1989 гг.) Рафаил Абрамович подготовил и защитил докторскую диссертацию. В 1990 году ему присвоено учёное звание профессора.

На протяжении периода работы в должности заведующего все свои усилия он направлял на развитие кафедры и горного факультета. Особое внимание на кафедре уделялось научно-исследовательской работе и подготовке кадров высшей квалификации. Постоянная связь с производством преподавателей кафедры и студентов, а также выполнение хозяйственных работ по заказам угледобывающих предприятий способствовали развитию не только научной деятельности, но и практической подготовки выпускников. Результаты этих исследований широко использовались в учебной работе при выполнении научных, курсовых и дипломных работ студентами специальности. Естественным является то, что в выполнении научно-исследовательских работ принимают участие студенты и аспиранты.

Регулярно студенты кафедры занимают призовые места на олимпиадах по специальности «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» и награждаются дипломами I, II и III степеней.

Под руководством Рафаила Абрамовича на кафедре создана научная школа «Прогнозирование условий разработки угольных месторождений и создание новой методологии проектирования шахт», в рамках которой выполнен большой цикл научно-исследовательских работ теоретического и прикладного характера. Результатом этих исследований стали публикации многих научных работ и защита 10 кандидатских и 2 докторских диссертаций, а также разработка 6 нормативных документов.

Фрумкин Р. А. является автором более 250 научных и научно-методических работ, в том числе 4 монографий, 8 учебных пособий, имеет 9 авторских свидетельств на изобретения в области горной отрасли. Им изданы и внедрены в практику 8 нормативных документов, в том числе 2 стандарта в области высшего образования.

Как производственник он придавал большое значение практической подготовке студентов. При его непосредственном участии заключались договоры на прохождение

практик с угольными производственными объединениями Донбасса и Кузбасса.

Коллектив кафедры гордится своими выпускниками, которые благодаря самоотверженному труду и творческому отношению к порученному делу достигли высокого положения в производственной, научной, общественной и государственной сферах. Среди них Герои Социалистического Труда, Герои Украины, депутаты всех уровней, министры, члены правительства, руководители регионов, известные учёные и общественные деятели: Воротников С.И., Гениевский С. И., Иванченко И. В., Колесников А. Я., Скрипник Н. Н., Шелест Г. Л., Дмитренко М. И., Аносов О. С., Астров-Шумилов Г. К., Гальченко А. М., Горовой Е. П., Йоффе Ю. Я., Княжев С. М., Лиликович В. И., Офицеров С. П., Подорванов А. А., Теросипов В. М., Зюков Ю. Е., Худяков Ю. Н.

На протяжении всей жизни Рафаил Абрамович вёл активную научно-исследовательскую деятельность, по результатам которой был разработан, издан и внедрён на шахтах Донбасса ряд нормативных документов всесоюзного и отраслевого уровней. Кроме того, он был участником Выставки достижений народного хозяйства (г. Москва) и награждён бронзовой медалью ВДНХ СССР.

По личной инициативе Фрумкина Р. А. и при его непосредственном участии в 2007 году был открыт Специализированный Учёный Совет по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук по специальности «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых». Рафаил Абрамович являлся председателем, а затем заместителем председателя Совета, функционирование которого позволило в значительной мере усилить кандидатами наук кадровый потенциал выпускающих кафедр горного факультета.

Только за последние годы лично Рафаилом Абрамовичем и совместно с коллегами по кафедре выполнены важные для горной отрасли работы:

ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

– создание комплексной системы прогнозирования условий проведения горных работ на шахтах Донбасса (рук. — проф. Фрумкин);

– разработка методологии функционально-стоимостного проектирования угольных шахт (авторы: проф. Фрумкин Р. А., проф. Окалелов В. Н.);

– оценка инвестиционной привлекательности резервных участков угольных месторождений Донбасса (рук.: проф. Фрумкин Р. А., проф. Окалелов В. Н.);

– новые эффективные технические решения по охране подготовительных выработок с использованием опор переменной жёсткости на базе тумб из железобетонных блоков, спаренных податливых цилиндров и присечных выработок (рук. — проф. Борzych А. Ф.);

– разработка эффективных технологий, способов и средств упрочнения неустойчивых пород в локальных зонах (рук. — проф. Клишин Н. К.).

Многочисленные достижения Рафаила Абрамовича в его творческой деятельности высоко оценены общественностью и структурами государственной власти.

За весомый личный вклад в развитие национального образования, подготовку высококвалифицированных специалистов для угольной промышленности, успехи в воспитании молодёжи Фрумкин Р. А. награждён знаком «Шахтёрская слава» всех трёх степеней, «Шахтёрская доблесть» III степени, медалью «Ветеран труда», а также Почётной грамотой Министерства образования и науки Украины и грамотой исполнительного комитета Алчевского городского совета.

Фрумкин Рафаил Абрамович прошёл славный путь от простого рабочего, десятника шахты «Холодная балка № 1», до заведующего кафедрой «Разработка месторождений полезных ископаемых» ДонГТУ, заслуженного деятеля науки и техники Украины, доктора технических наук, профес-

сора, академика Академии горных наук Украины и академика Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ).

Фрумкина Р. А. всегда отличала активная жизненная позиция. Его аргументированные выступления на Учёном Совете университета нередко обуславливали принятие важных для коллектива ВУЗа перспективных решений, которые не всегда совпадали с позицией руководства. О таких говорят: «Он не пасует перед руководством». Несмотря на строгий характер, он был требовательным и справедливым руководителем, уделял постоянное внимание и оказывал необходимую помощь молодым коллегам и творческим студентам. Он принадлежал к когорте учёных, руководствующихся принципом, что «участвовать в дискуссии следует только тогда, когда можешь сказать что-то новое».

Рафаил Абрамович был не только выдающимся учёным, но и любящим, заботливым и внимательным мужем, отцом, дедушкой. Всё своё свободное время он отдавал семье и любимому делу. Каждое новое утро он начинал с зарядки, независимо от того, был это рабочий или выходной день. Его всегда интересовали дела и интересы жены, дочери, внуки. Ни одно семейное начинание не проходило без его одобрения и дельного совета. Его наибольшей отрадой была внучка, в судьбе которой он принимал живое участие. К сожалению, смерть лишила Рафаила Абрамовича возможности обнять, поцеловать и поздравить её с успешной защитой выпускной квалификационной работы в июне 2018 г.

Его кончина стала большой утратой для семьи, коллег, друзей и близких.

Светлая память навсегда останется в сердцах тех, кому посчастливилось трудиться и общаться с профессором Фрумкиным Рафаилом Абрамовичем.

ТРЕБОВАНИЯ
к рукописям научных статей в сборник научных трудов
ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
«ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Научные статьи, предоставляемые в редакцию, должны соответствовать требованиям ВАК МОН ДНР (Приложение 1 к правилам формирования в уведомительном порядке перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора (п. 4)) и базовым издательским стандартам по оформлению статей по ГОСТ 7.5-98 «Журналы, сборники, информационные издания».

Сборник научных трудов издаётся 1–4 раза в год. Сборник формирует информационный отдел: 94204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16, ДонГТУ; тел./факс: (06442) 2-68-87, e-mail: info@dstu.education (тема: для редакции сборника научных трудов ГОУВПО ЛНР «ДонГТУ»); секретарь редакционной коллегии Скомская Светлана Анатольевна.

Сборник содержит следующие разделы: «Науки о земле», «Металлургия и материаловедение», «Машиностроение и машиноведение», «Строительство и архитектура».

Содержание статей должно отвечать новым достижениям науки и техники, их практическому значению, соответствовать технической направленности сборника и представлять интерес для широкого круга специалистов.

В статье должно быть кратко изложено то новое и оригинальное, что разработано авторами, показано преимущество перед аналогами предлагаемых разработок, описаны их особенности и практическая значимость. Результаты работы не должны предоставляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, несоблюдение действующих стандартов и за недостоверность приведённых в статье данных полностью несут авторы статьи.

Статья должна сопровождаться:

– внутренней и внешней рецензиями (на усмотрение автора, рекомендовано два вида рецензий: рецензия в произвольном изложении; международная форма рецензирования статьи);

– лицензионным договором с автором(и).

Текст статьи предоставляется на электронном носителе **в формате, полностью совместимом с Word 97–2003**, сопроводительная документация только в печатном виде.

Рекомендуемое количество авторов статьи до 3-х человек. При необходимости, по решению редколлегии, количество авторов может быть увеличено до 5-ти.

Языки предоставления статей: русский, английский, украинский.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

Текст рукописи статьи от 5 до 10 страниц в книжной ориентации на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) с полями: верхнее, нижнее — 27 мм; левое — 23 мм, правое — 25 мм. Различать колонтитулы чётных и нечётных страниц: от края до верхнего колонтитула — 2 см; от края до нижнего колонтитула — 2 см. Страницы не нумеруются. Рукопись статьи оформляется с применением редактора MS Word (не ниже версии 6.0 и не старше версии 11(2003)): шрифт — Times New Roman, размер — 12 пт, интервал — одинарный, выравнивание — по ширине, абзацный отступ — 0,5 см.

Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **активирована**. Весь материал подаётся в чёрно-белом оформлении (без градиентов серого или цветовой палитры).

Не допускается использование списков (маркированных и нумерованных) и элементов «Надпись».

Запрещается вставлять в рукопись сканированные рисунки (графики, диаграммы) и другие неизменяемые объекты (формулы).

Оформление статей

Статья подаётся отдельным файлом «*Статья.doc*».

УДК проставляется вверху, выравнивание по левому краю, шрифт полужирный, без абзацного отступа.

Через один интервал — учёная степень, фамилия, инициалы, разделённые пробелом. С новой строки в круглых скобках через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. Шрифт полужирный, курсив, выравнивание по правому краю, без абзацного отступа.

С новой строки — название статьи. Выравнивание по центру, шрифт Arial, полужирный, видоизменение — все прописные, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца — 12 пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. **Не допускается** набор всего названия заглавными буквами (Caps Lock).

С новой строки — краткая аннотация на языке публикации: размер шрифта — 11 пт, курсив.

После аннотации с новой строки — ключевые слова (6–8 слов на языке статьи), курсивом, размером 11 пт, интервал после абзаца — «Авто». Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

С новой строки — текст статьи в **две колонки** одинаковой ширины, промежуток между колонками — 0,5 см.

Слова «рисунок» и «таблица» при упоминаниях в тексте пишутся полностью (пример: «... на рисунке 2 ...»), а в ссылках в конце предложения — сокращённо в скобках (примеры: «... схема инвертора (рис. 2).», «... получены экспериментальные данные (табл. 4).»).

После текста статьи полужирным шрифтом размером 11 пт располагается заголовок «Библиографический список»: интервал перед абзацем — 12 пт, после абзаца — 8 пт, выравнивание по левому краю.

Библиографический список оформляется согласно ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления» размером 11 пт, курсивом и должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. Рекомендованное количество ссылок — не более восьми источников с датой их издания не ранее чем 20 лет назад.

Через один интервал — учёная степень, фамилия, инициалы, полное название организации, название статьи, аннотации и ключевые слова на оставшемся языке из двух (русский, украинский), размером шрифта 11 пт.

Учёная степень, фамилия, инициалы оформляются полужирным шрифтом, без абзацного отступа, выравниванием по ширине. В круглых скобках курсивом через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора.

С новой строки, без абзацного отступа, выравниванием по ширине — название статьи заглавными буквами.

С новой строки — краткая аннотация курсивом.

С новой строки — ключевые слова курсивом. Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

Оформление аннотаций отдельным файлом

Аннотация и ключевые слова дополнительно подаются на двух языках (русский, украинский) отдельным файлом «*Аннотация.doc*», размером шрифта 11 пт.

Учёная степень, фамилия, инициалы оформляются полужирным шрифтом, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. В круглых скобках курсивом через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. С новой строки, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю — название статьи заглавными буквами.

С новой строки — краткая аннотация курсивом.

С новой строки — ключевые слова курсивом. Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

Не допускается внедрение в текст аннотации объектов (формул, рисунков и т. д.).

Оформление рефератов отдельным файлом

Реферат подаётся на двух языках (русский, украинский) отдельным файлом «*Реферат.doc*»: размер шрифта — 11 пт, без абзацного отступа, выравнивание — по левому краю. Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **выключена**.

Фамилия, имя, отчество оформляются полужирным шрифтом.

С новой строки — учёная степень, должность.

С новой строки — название подразделения.

С новой строки через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора.

Через интервал повторить данные для каждого автора.

Через интервал — название статьи (полужирным начертанием).

Через интервал — текст реферата. Реферат объёмом от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии должен быть структурированным и содержать следующие элементы: цель, методика, результаты, научная новизна, практическая значимость. Фразы «Цель.», «Методика.», «Результаты.», «Научная новизна.», «Практическая значимость.» (на русском языке), «Мета.», «Методика.», «Результати.», «Наукова новизна.», «Практичне значення.» (на украинском языке), «Aim.», «Technique.», «Results.», «Scientific novelty.», «Practical significance.» (на английском языке) размещаются с новой строки и выделяются полужирным начертанием. Реферат не должен повторять название статьи.

Не допускается внедрение в текст реферата объектов (формул, рисунков, и т. д.).

Рисунки

Рисунки вставляются в текст единым объектом и могут быть представлены:

– *растровыми форматами* — gif, tiff, jpg, bmp и им подобными (качество 300 dpi);

– *векторными форматами* — emf, wmf.

Рисунки, выполненные в программах Corel, CAD, Word и др., переводятся в один из описанных выше форматов, предпочтительно векторный.

Графический материал следует располагать непосредственно после текста, в котором он упоминается впервые или на следующей странице. Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте и нанесены слева направо, сверху вниз. Перед рисунком интервал 12 пт. Выравнивание по центру, ширина в одну колонку (большие рисунки располагают на ширину страницы вверху или внизу). Рисунки размещают в тексте (не в таблицах), обтекание рисунка — «в тексте». Все рисунки подаются дополнительно отдельными файлами.

Допускается размещение пояснительных данных под иллюстрацией (подрисуночный текст) с выравниванием по центру, без абзацного отступа, размером 10 пт.

Под каждым рисунком (подрисуночным текстом) располагается надпись в формате «Рисунок № Название» с выравниванием по центру без абзацного отступа, интервалом перед и после абзаца — (Авто), размером шрифта 11 пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. Статья не должна заканчиваться рисунком. Рекомендуется, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема статьи.

Формулы

Абзац, содержащий формулы, должен иметь следующие параметры: выравнивание по левому краю, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца 6 пт, позиции табуляции — 3,93 см по центру (для расположения формулы) и 7,85 см по правому краю (для расположения номера формулы). Формулы целиком (включая размерности) выполняются с помощью редактора формул Microsoft Equation 3 математическим стилем, обычное начертание шрифта (нормальный), со следующими размерами:

| | |
|---|-----------|
| Full (обычный)..... | 12 pt |
| Subscript/Superscript (крупный индекс) | 9 pt |
| Sub-Subscript/Superscript (мелкий индекс) | 7 pt |
| Symbol (крупный символ)..... | 14 pt |
| Sub-Symbol (мелкий символ)..... | 12 pt |
| Формат | по центру |
| Междустрочный интервал | 200 % |

Недопустимо масштабирование и размещение формул в табличном формате. В одном блоке формулы, попадающем на границу колонок, допускается только одна строка (многострочные формулы разбиваются на блоки). Упоминание элементов формул в тексте статьи также выполняется в редакторе формул.

Таблицы

Все таблицы располагаются после упоминания в тексте и должны иметь нумерационный заголовок и название (размер шрифта 11 пт). Нумерационный заголовок (*Таблица 1*) выравнивается по правому краю над таблицей, курсив, интервал перед абзацем — 12 пт. С новой строки помещают название выравниванием по центру, без абзацного отступа, с запретом автоматического переноса слов в абзаце; интервал после абзаца — 6 пт.

Таблица выравнивается по центру контейнера, в книжной ориентации, шириной в 1 колонку (большие таблицы располагаются на ширину страницы вверху или внизу). Текст в таблице оформляется размером шрифта 11 пт или 12 пт, без абзацного отступа. **Не допускается** заливка ячеек таблицы цветом. **Запрещается** располагать таблицу в альбомной ориентации. После таблицы отступается один интервал.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

| | |
|--|----|
| <i>Литвинский Г. Г.</i> КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ И ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД ВОКРУГ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ | 5 |
| <i>Смекалин Е. С., Полозов Ю. А., Сичак Ю. Н., Гришко Н. В., Коваленко Н. В.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ГОРНОПРОХОДЧЕСКИХ РАБОТ С УЧЁТОМ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ПРИРОДЫ ИХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ | 17 |
| <i>Палейчук Н. Н., Князьков О. В., Сичак Ю. Н.</i> О ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ АСПЕКТАХ ГЕОТЕХНОЛОГИИ | 25 |
| <i>Бизянов Е. Е., Смекалин Е. С.</i> ОБЗОР И ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕОРИИ НЕЧЁТКИХ МНОЖЕСТВ В ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЁТАХ | 30 |
| <i>Калякин С. А., Лабинский К. Н., Азаматов Р. И.</i> ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ В ЗАБОЯХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ СОТРЯСАТЕЛЬНОМ ВЗРЫВАНИИ | 39 |
| <i>Денисенко В. П.</i> ВЛИЯНИЕ МАЛОАМПЛИТУДНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ МАССИВА НА ДИНАМИКУ МЕТАНООБИЛЬНОСТИ ВЫРАБОТОК ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА | 46 |
| <i>Павлов Е. Е.</i> ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ЗАБУТОВКИ ЗАКРЕПНОГО ПРОСТРАНСТВА НА ПАССИВНЫЙ ОТПОР ПОРОД ВОКРУГ ВЫРАБОТОК | 51 |

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

| | |
|--|----|
| <i>Снитко С. А., Сотников А. Л., Яковченко А. В.</i> СИЛОВЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ФОРМОВОЧНОГО ПРЕССА ПРИ ШТАМПОВКЕ КОЛЁСНЫХ ЗАГОТОВОК | 57 |
| <i>Куберский С. В.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ МАРГАНЦА В ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ РАСПЛАВЫ | 64 |
| <i>Куберский С. В., Проценко М. Ю., Воронько М. И., Проценко В. И.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ЭЛЕКТРОДНОЙ СМЕСИ НА ЕЁ УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ | 70 |
| <i>Давиденко В. А., Лисовая А. А.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ ПАО «АМК», НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИТОМЕЛИОРАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ | 76 |

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

| | |
|---|-----|
| <i>Дрозд Г. Я.</i> ПОТЕНЦИАЛ РАЗВИТИЯ СЕКТОРА ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ НА ЛУГАНЩИНЕ | 83 |
| <i>Рябинина М. М.</i> ВЛИЯНИЕ ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА СОСТОЯНИЕ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ | 99 |
| <i>Заворотный Д. В.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОТЕНКОВ- ОСВЕТИТЕЛЕЙ С ЗАТОПЛЕННОЙ ЭРЛИФТНОЙ СИСТЕМОЙ АЭРАЦИИ | 104 |

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| <i>Еронько С. П., Ошовская Е. В., Стародубцев Б. И.</i> РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ОТСЕЧКИ ШЛАКА ПРИ ВЫПУСКЕ СТАЛИ ЧЕРЕЗ ГОРЛОВИНУ КОНВЕРТЕРА | 113 |
| <i>Коваленко О. А., Куберский С. В., Новохатский А. М.</i> РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ СТОЙКОСТИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ШТАМПОВ | 121 |
| <i>Грубка Р. М.</i> РАЗВИТИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА СИНТЕЗА ПРОФИЛЯ ЗУБЬЕВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОСТРАНСТВЕННОМУ ЗУБЧАТОМУ СОЕДИНЕНИЮ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС | 127 |
| <i>Арефьев Е. М., Игнаткина Е. Л., Кныш А. А.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВИБРООЧИСТИТЕЛЯ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ С СИМИСТОРНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ | 133 |

ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

| | |
|---|-----|
| <i>Белозерцев В. Н., Ульяницкий В. Н.</i> ПАМЯТИ ГОРНОГО ИНЖЕНЕРА, УЧЁНОГО, ПЕДАГОГА | 141 |
|---|-----|

ЗМІСТ

НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ

| | |
|---|----|
| <i>Литвинський Г. Г.</i> | |
| КІНЕТИКА РУЙНУВАННЯ І ДЕФОРМУВАННЯ ПОРІД НАВКОЛО ГІРСЬКОЇ ВИРОБКИ | 5 |
| <i>Смекалін Є. С., Полозов Ю. А., Спичак Ю. М., Гришко Н. В., Коваленко Н. В.</i> | |
| ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ГІРНИЧОПРОХІДНИЦЬКИХ РОБІТ З УРАХУВАННЯМ ІМОВІРНІСНОЇ ПРИРОДИ ЇХ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СТРУКТУРИ | 17 |
| <i>Палейчук М. М., Князьков О. В., Спичак Ю. М.</i> | |
| ПРО ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ГЕОТЕХНОЛОГІЇ | 25 |
| <i>Бізянов Є. Є., Смекалін Є. С.</i> | |
| ОГЛЯД І МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН В ГЕОТЕХНОЛОГІЧНИХ РОЗРАХУНКАХ | 30 |
| <i>Калякін С. О., Лабінський К. М., Азаматов Р. І.</i> | |
| ЛОКАЛІЗАЦІЯ РАПТОВИХ ВИКИДІВ У ЗАБОЯХ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК ПРИ СТРУСНОМУ ПІДРИВАННІ | 39 |
| <i>Денисенко В. П.</i> | |
| ВПЛИВ МАЛОАМПЛІТУДНИХ ТЕКТОНІЧНИХ ПОРУШЕНЬ МАСИВУ НА ДИНАМІКУ БАГАТОМЕТАНОВОСТІ ВИРОБОК ВИЙМАЛЬНОЇ ДІЛЯНКИ | 46 |
| <i>Павлов Є. Є.</i> | |
| ВПЛИВ ЩІЛЬНОСТІ ЗАБУТОВКИ ЗАКРІПНОГО ПРОСТОРУ НА ПАСИВНИЙ ОПІР ПОРІД НАВКОЛО ВИРОБОК | 51 |

МЕТАЛУРГІЯ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

| | |
|---|----|
| <i>Снітко С. О., Сотников О. Л., Яковченко О. В.</i> | |
| СИЛОВІ РЕЖИМИ РОБОТИ ФОРМУВАЛЬНОГО ПРЕСА ПРИ ШТАМПУВАННІ КОЛІСНИХ ЗАГОТОВОК | 57 |
| <i>Куберський С. В.</i> | |
| ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ ДУГОВОГО ГЛИБИННОГО ВИЛУЧЕННЯ МАРГАНЦЮ В ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВІ РОЗПЛАВИ | 64 |
| <i>Куберський С. В., Проценко М. Ю., Воронько М. І., Проценко В. І.</i> | |
| ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДУ ЕЛЕКТРОДНОЇ СУМІШІ НА ЇЇ ПИТОМИЙ ЕЛЕКТРООПІР | 70 |
| <i>Давиденко В. А., Лісова А. О.</i> | |
| ВИЗНАЧЕННЯ ВИКИДІВ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРУ ПАТ «АМК», НЕОБХІДНИХ ДЛЯ ВСТАНОВЛЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ФІТОМЕЛІОРАЦІЙНИХ ЗАХОДІВ | 76 |

БУДІВНИЦТВО ТА АРХІТЕКТУРА

| | |
|--|-----|
| <i>Дрозд Г. Я.</i> | |
| ПОТЕНЦІАЛ РОЗВИТКУ СЕКТОРА ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ НА ЛУГАНЩИНІ | 83 |
| <i>Рябініна М. М.</i> | |
| ВПЛИВ ПОГОДНО-КЛІМАТИЧНИХ УМОВ НА СТАН ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ | 99 |
| <i>Заворотний Д. В.</i> | |
| ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОТЕНКІВ- ОСВІТЛЮВАЧІВ З ЗАТОПЛЕНОЮ ЕРЛІФТНОЮ СИСТЕМОЮ АЕРАЦІЇ | 104 |

МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАШИНОЗНАВСТВО

| | |
|--|-----|
| <i>Єронько С. П., Ошовська О. В., Стародубцев Б. І.</i> РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ ГАЗОДИНАМІЧНОГО ВІДСІЧЕННЯ ШЛАКУ ПІД ЧАС ВИПУСКУ СТАЛІ ЧЕРЕЗ ГОРЛОВИНУ КОНВЕРТЕРА ... | 113 |
| <i>Коваленко О. О., Куберський С. В., Новохатський О. М.</i> РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ РОЗДІЛОВИХ ШТАМПІВ | 121 |
| <i>Грубка Р. М.</i> РОЗВИТОК КІНЕМАТИЧНОГО МЕТОДУ СИНТЕЗУ ПРОФІЛЮ ЗУБІВ СТОСОВНО ДО ПРОСТОРОВОГО ЗУБЧАСТОГО З'ЄДНАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС | 127 |
| <i>Ареф'єв Є. М., Ігнаткіна Є. Л., Книш А. А.</i> ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІБРООЧИСНИКА КОНВЕЄРНОЇ СТРІЧКИ З СИМІСТОРНОЮ СИСТЕМОЮ УПРАВЛІННЯ | 133 |

ІНФОРМАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

| | |
|---|-----|
| <i>Бєлозерцев В. Н., Ульяницький В. Н.</i> ПАМ'ЯТІ ГІРНИЧОГО ІНЖЕНЕРА, ВЧЕНОГО, ПЕДАГОГА | 141 |
|---|-----|

CONTENT**GEOSCIENCES**

| | |
|---|----|
| <i>Litvinskiy G. G.</i> KINETICS OF ROCKS DESTRUCTION AND DEFORMATION AROUND MINING EXCAVATION | 5 |
| <i>Smekalin E. S., Polozov Yu. A., Spichak Yu. N., Grishko N. V., Kovalenko N. V.</i> DETERMINING THE DURATION OF MINING OPERATIONS CONSIDERING THE PROBABILISTIC NATURE OF THEIR ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL STRUCTURE | 17 |
| <i>Paleyichuk M. M., Knyaz'kov O. V., Spichak Yu. N.</i> ABOUT TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF GEOTECHNOLOGY | 25 |
| <i>Bizianov E. E., Smekalin E. S.</i> REVIEW AND POSSIBILITY OF USING THE THEORY OF FUZZY SETS IN GEOTECHNOLOGICAL CALCULATIONS | 30 |
| <i>Kaliakin S. A., Labinskiy K. N., Azamatov R. I.</i> LOCALIZATION OF SUDDEN OUTBURST IN WORKING FACES AT SHOCK BLASTING | 39 |
| <i>Denisenko V. P.</i> INFLUENCE OF SMALL-AMPLIFIED TECTONIC BREAKDOWNS OF THE MASSIVE ON THE DYNAMICS OF THE METHAN-BEARING CAPACITY IN THE WORKINGS OF THE CUTTING SITE..... | 46 |
| <i>Pavlov E. E.</i> INFLUENCE OF THE CUSHIONING DENSITY OF FIXED SPACE ON THE PASSIVE ROCK BEARING REACTION AROUND WORKINGS | 51 |

METALLURGY AND MATERIAL SCIENCES

| | |
|--|----|
| <i>Snitko S. A., Sotnikov A. L., Yakovchenko A. V.</i> POWER OPERATION MODES OF MOLDING PRESS AT WHEEL BLANKS DIE FORMING | 57 |
| <i>Kuberskiy S. V.</i> OPTIMIZATION OF REDUCTION MIXTURES COMPOSITION FOR AN ARC DEPTH EXCRETION OF THE MANGANESE INTO IRON-CARBON MELTS | 64 |
| <i>Kuberskiy S. V., Protsenko M. Yu., Voron'ko M. I., Protsenko V. I.</i> INVESTIGATING THE EFFECT OF ELECTRODE MIXTURE COMPOSITION ON ITS SPECIFIC ELECTRICAL RESISTANCE | 70 |
| <i>Davidenko V. A., Lisovaia A. A.</i> DETERMINING THE LEVEL OF HAZARDOUS EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE BY PJSC «ALCHEVSK IRON-AND-STEEL WORKS» FOR ASCERTAINMENT THE NECESSITY OF FITOMELIORATION MEASURES | 76 |

CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

| | |
|---|-----|
| <i>Drozd G. Ya.</i> DEVELOPMENT POTENTIAL OF THE MUNICIPAL WASTE SECTOR IN LUGANSCHINA | 83 |
| <i>Riabinina M. M.</i> INFLUENCE OF WEATHER AND CLIMATE CONDITIONS ON THE ROAD SURFACE STATE | 99 |
| <i>Zavorotnyi D. V.</i> EXPERIMENTAL DETERMINING THE PARAMETERS FOR DESIGNING THE AIR TANK- CLARIFIERS WITH SUBMERGED AIRLIFT AERATION SYSTEM | 104 |

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Eron'ko S. P., Oshovskaya Ye. V., Starodubtsev B. I.

CALCULATING THE PARAMETERS OF AUTOMATIC SYSTEM OF GAS DYNAMIC SLAG CUTOFF AT STEEL TAPING THROUGH THE VESSEL MOUTH 113

Kovalenko O. A., Kuberskiy S. V., Novokhatskiy A. M.

DEVELOPMENT OF THE RECOMMENDATION FOR INCREASING THE STABILITY OF SHEARING DIES 121

Grubka R. M.

DEVELOPMENT OF KINEMATIC METHOD OF TEETH PROFILE SYNTHESIS WITH REGARD TO SPATIAL SERRATED JOINT OF CYLINDRICAL GEARS 127

Aref'iev E. M., Ignatkina E. L., Knysh A. A.

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE OPERATING MODE EFFICIENCY OF VIBRATION CLEANER OF CONVEYOR BELT WITH TRIAC CONTROL SYSTEM 133

INFORMATION MATERIALS

Belozercev V. N., Ulianitskiy V. N.

IN MEMORY OF THE MINING ENGINEER, SCIENTIST, TEACHER 141

УДК 622(06) + 669(06) + 69(06) + 65.011.56 + 621.3 +
+ 33 + 621.37 + 1

**Збірник наукових праць
Донбаського державного
технічного університету**

Збірник

Випуск 10 (53) 2018

**Засновник:
Донбаський державний технічний
університет**

*Свідоцтво Міністерства інформації,
друку і масових комунікацій ЛНР
про державну реєстрацію засобу масової
інформації МІ-СГР ПІ 000003
від 05.02.2016*

*Наказом Міністерства освіти і науки Донецької
Народної Республіки від 2 травня 2017 р № 464
збірник наукових праць включений до Переліку
рецензованих наукових видань, в яких повинні
бути опубліковані основні наукові результати
дисертацій на здобуття наукового ступеня
кандидата наук, на здобуття наукового ступеня
доктора наук, затвердженого наказом
Міністерства освіти і науки Донецької Народної
Республіки від 1 листопада 2016 р № 1134, згідно
з додатком І.*

*Рекомендовано вченою радою
ДСУВПО ЛНР «ДонДТУ»
(Протокол № 10 від 19.06.2018)*

Включений до наукометричної бази даних РІНЦ

Формат 60×84¹/₈.
Ум. друк. арк. 9,6
Зам. №

Наклад 100 пр.

Видавництво не несе відповідальності за зміст
матеріалу, наданого автором до друку.

Адреса редакції, видавця
та виготовлювача:
ДСУ ВПО ЛНР
«Донбаський державний технічний університет»
пр. Леніна, 16, м. Алчевськ, ЛНР, 94204.
E-mail: info@dstu.education
Web-site: <http://www.dstu.education>

ВИДАВНИЧО-ПОЛІГРАФІЧНИЙ ЦЕНТР,
ауд. 2113, т./факс 2-58-59
Свідоцтво про державну реєстрацію видавця,
виготовлювача
і розповсюджувача засобу масової інформації
МІ-СГР ВД 000055 від 05.02.2016.

Головний редактор

Зінченко А. М. — к.е.н., в.о. ректора

Заступник головного редактора

Новохатський А. М. — д.т.н., проф.

Редакційна колегія:

Литвинський Г. Г. — д.т.н., проф.

Фінкельштейн З. Л. — д.т.н., проф.

Корнєєв С. В. — д.т.н., проф.

Леонов А. О. — к.т.н., доц.

Харламов Ю. А. — д.т.н., проф.

Ульяницький В. Н. — к.т.н., проф.

Зелінський А. М. — к.т.н., проф.

Куберський С. В. — к.т.н., проф.

Денищенко П. М. — к.т.н., доц.

Дрозд Г. Я. — д.т.н., проф.

Шолух М. В. — д. арх., проф.

Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.

Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомська С. А. — секретар редакційної
колегії.

Для наукових співробітників, аспірантів,
студентів вищих навчальних закладів

Мова видання:

російська, українська та англійська

Комп'ютерна верстка і коректура
Ісмаїлова Л. М.

© ДСУВПО ЛНР «ДонДТУ», 2018
© Чернишова Н. В., художнє
оформлення обкладинки, 2018

**UDK 622(06) + 669(06) + 69(06) +
+ 65.011.56 + 621.3 + 33 + 621.37 + 1**

**Collection of scientific papers
of Donbass State Technical
University**

Collection

Issue 10 (53) 2018

**Establisher: Donbass
State Technical
University**

*Certificate of Ministry of Information,
Press and Mass Communication of LPR
for mass media registration
MI-SGR PI 000003
dated 05.02.2016*

*By order of the Department of Education and
Science of Donetsk People Republic of 2 May
2017 № 464 the Collection of scientific papers
is being offered in the list of peer-reviewed
scientific editions with required publications
of the main scientific PhD and Doctor's thesis
results, approved by an order of the Department
of Education and Science of Donetsk People
Republic of 1 November 2016 № 1134,
according to annex 1.*

*Recommended by academic council of DonSTU
(Record № 10 dated 19.06.2018)*

Added to scientometrical data base of RSCI

Format 60×84%.
Conventional printed sheet 9,6
Order №
Circulation 100 copies
Publishing office is not responsible for
material content giving by author for
publishing.

Address of editorial office, publishing and
establishing: Donbass State Technical
University
Lenin avenue, 16, Alchevsk, LPR
94204
E-mail: info@dstu.education
Web-site: <http://www.dstu.education>

PUBLISHING AND PRINTING
CENTER,
Room 2113, tel/fax 2-58-59
Certificate of State registration for mass
media publisher, owner and distributor
MI-SGR ID 0000055 dated 05.02.2016

Editor-in-chief

Zinchenko A. M. — PhD in Engineering,
acting rector

Deputy chief editor

Novohatskyi A. M. — Doctor of tech. sc., prof.

Editorial board:

Litvinskyi G. G. — Doctor of tech. sc., prof.
Finkelstein Z. L. — Doctor of tech. sc., prof.
Korneiev S. V. — Doctor of tech. sc., prof.
Leonov A. A. — PhD in Engineering
Kharlamov Yu. A. — Doctor of tech. sc., prof.
Uliianitskyi V. N. — PhD in Engineering, prof.
Zelinskyi A. N. — PhD in Engineering, prof.
Kuberskyi S. V. — PhD in Engineering, prof.
Denisschenko P. N. — PhD in Engineering
Drozd G. Ya. — Doctor of tech. sc., prof.
Sholukh N. V. — Doctor of arch., prof.
Bondarchuk V. V. — PhD in Engineering
Psjuk V. V. — PhD in Engineering
Skomskaia S. A. — Secretary to the editorial board.

For research scientists, PhD seekers, students of
higher educational institutions.

Issue language:

Russian, Ukrainian, English

Computer layout and proofreading
Ismailova L. M.